



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVO

PROYECTO FIN DE CARRERA

FERNANDO GARCÍA ÚBEDA

DIRECTORA: Dña. EVA FRANCÉS PÉREZ

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA QUÍMICA Y
TECNOLOGÍAS DEL MEDIO AMBIENTE

TITULACIÓN: INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL,
ESPECIALIDAD EN QUÍMICA INDUSTRIAL

Septiembre - 2013

Agradecimientos:

A mi Directora de proyecto, Dña. Eva Francés Pérez, que sin ella no sería posible este trabajo, gracias Eva por todo.

También a mis profesores de universidad de los cuales tanto he aprendido.

Y sobre todo a mi familia a la que le debo todo en esta vida, y la que siempre ha estado a mi lado en todos los momentos, sobre todo, en los difíciles, gracias Papá, Mamá y Hermano.

Agradecimientos a mi novia y a mis compañeros y amigos que han recorrido este camino conmigo, sin ellos esto hubiera sido mucho más complicado. Gracias a Arturo, Iván y Pablo, vuestra amistad me llevo como regalo. Y en especial agradecer a Javier, con el que no solo he superado la carrera gracias a todas nuestras horas en la Biblioteca, llenas de dificultades superadas juntos, si no que el vínculo que ha nacido de ello, se ahora, que es algo más que una amistad. Gracias Javi.



RESUMEN

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de una planta de producción de carbón activo en España con una producción anual de 1.000 toneladas al año.

El proceso de activación elegido es el químico, utilizando como activante el ácido fosfórico, y en el que el precursor elegido es la madera de Pino. Se buscará una zona que beneficie el proceso de producción de la empresa, buscando una zona cercana a la materia prima para la producción (zona boscosa). La empresa estará situada en Huesca (Aragón), en el polígono industrial, plataforma logística Huesca-Sur (PLHUS).

Se describirá el proceso de producción, máquinas y material utilizado a lo largo de todo el proceso, materias primas y aditivos que se necesitan, etc. Así como los cálculos necesarios de los equipos, así como las cantidades necesarias de los productos a introducir para conseguir todo lo necesario para la puesta en marcha.

Por otra parte se dará a conocer uno de los productos industriales más famosos en el presente: El carbón activo.

Estructura y propiedades, métodos de producción, tipos de productos que se comercializan, usos y aplicaciones, entre otras.

El objetivo final es la realización del Proyecto Fin de Carrera cuyo peticionario es la Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza (EINA), dentro de la especialidad de Química Industrial.

ÍNDICE

1. ADSORCIÓN	1
1.1. Proceso de Adsorción	1
1.2. Tipos de Adsorción	2
1.3. Parámetros que influyen en las propiedades de adsorción	4
1.4. Isotermas de Adsorción	7
1.4.1. Isotherma de Freundlich	8
1.4.2. Isotherma de Langmuir	9
1.4.3. Isotherma BET	10
1.5. Adsorbentes	12
1.5.1. Características de un adsorbente	12
1.5.2. Tipos de adsorbentes	14
2. CARBÓN ACTIVO	15
2.1. Antecedentes Históricos	15
2.2. Concepto de Carbón	18
2.3. Concepto de Carbón Activo	20
2.4. Propiedades	22
2.4.1. Adsorbente Universal	23
2.4.2. Carácter hidrófobo	24
2.4.3. Naturaleza Anfótera	24
2.5. Características	26
2.5.1. Estructura Porosa	27
2.5.2. Número de yodo y área superficial	32
2.5.3. Rango de tamaño de partícula, tamaño efectivo de partícula y coeficiente de uniformidad	33
2.5.4. Contenido de cenizas totales y número de solubles en agua	34
2.5.5. pH del extracto acuoso	35
2.5.6. Otras características	35

2.6. Tipos de carbones activos	38
2.6.1. Carbón Activo en Polvo (CAP).....	39
2.6.2. Carbón Activo Granular (CAG)	42
3. PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVO	47
3.1. Materias primas	47
3.2. Trituración	50
3.2.1. Trituradores de mandíbulas	52
3.2.2. Trituradores de cono.....	54
3.2.3. Trituradores de cilindros	55
3.2.4. Triturador de tambor	56
3.3. Impregnación.....	58
3.4. Carbonización	60
3.5. Activación	65
3.5.1. Activación térmica	65
3.5.2. Activación química.....	73
3.5.3. Hornos rotatorios	78
3.6. Lavado del material.....	86
3.6.1. Columnas de platos.....	88
3.6.2. Torres de relleno	88
3.7. Proceso de secado del carbón activo.....	90
3.7.1. Secadores	90
3.8. Descripción de los transportes internos	94
3.8.1. Cintas transportadoras	94
3.8.2. Elevador de cangilones.....	98
3.8.3. Otros tipos de transporte	101
3.9. Almacenamiento del carbón activo	105
3.9.1. Ensacado y carga del carbón activo	106
3.10. Bombas y tuberías	109

3.10.1. Tuberías	109
3.10.2. Bombas	112
3.11. Empresas productoras de carbón activo	115
3.11.1. Cabot Norit activated carbon	115
3.11.2. Grupo Clarimex	117
3.11.3. Brascarbo	118
3.11.4. Donau carbon	118
3.11.5. Carbotecnía	119
3.11.6. Chemviron Carbon	120
4. APLICACIONES	123
4.1. Adsorción de compuestos en fase gaseosa	125
4.2. Adsorción en fase líquida	126
4.2.1. Tratamiento de aguas para consumo humano	128
4.2.2. Compuestos orgánicos.....	129
4.2.3. Compuestos inorgánicos.....	133
4.3. Otras aplicaciones.....	135
4.3.1. Aplicaciones catalíticas	135
4.3.2. Aplicaciones médicas	135
4.4. Equipos de adsorción	136
4.4.1. Lecho móvil.....	138
4.4.2. Lecho fluidizado	139
4.4.3. Lecho fijo.....	140
5. REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO.....	143
5.1. Tipos de regeneración	144
5.1.1. Regeneración por vapor	146
5.1.2. Regeneración química	149
5.1.3. Regeneración térmica	149
5.1.4. Procesos alternativos de regeneración.....	150

6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	155
6.1. Localización de la planta: Comunicación y transporte	155
6.2. Materias primas y reactivos	161
6.3. Descripción de la planta	164
6.3.1. Almacenamiento de materias primas y reactivos	169
6.3.2. Trituración: Obtención del serrín	173
6.3.3. Impregnación: Tanque mezclador	174
6.3.4. Activación del carbón	178
6.3.5. Lavado del carbón activo	182
6.3.6. Secado	186
6.3.7. Almacenamiento del carbón activo	187
6.3.8. Ensacado y carga del carbón activo	188
6.4. Presupuesto	190
7. CÁLCULOS DEL PROCESO	193
7.1. Elección del proceso	193
7.2. Balances de materia y de energía	194
7.2.1. Balances de materia	196
7.2.2. Balance de energía	203
7.3. Cálculo del volumen del horno: Volúmenes materias primas y reactivos	215
7.4. Selección de los equipos	216
7.4.1. Equipos para la recepción y almacenamiento de materias primas, reactivos y productos	216
7.4.2. Aparatos principales del proceso	220
7.5. Bombas y tuberías	225
7.5.1. Bomba y tuberías ácido fosfórico para el tanque mezclador	227
7.5.2. Bombas y tuberías de la 4ª fase del horno: Enfriamiento	236

7.5.3. Bombas y tuberías del lavado.....	240
8. FUENTES DE INFORMACIÓN	249

CARBÓN ACTIVO

1. ADSORCIÓN

1.1. Proceso de Adsorción

En términos generales el proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una disolución a través de una superficie líquida o sólida. Una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido o del líquido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales. El sólido se denomina adsorbente y el soluto a adsorber se denomina adsorbato.

La adsorción es un fenómeno de superficie: Las moléculas, átomos o iones adsorbidos están confinados en la superficie de los poros del sólido, unidos por fuerzas de Van der Waals, o por verdaderos enlaces químicos. Solamente los sólidos que posean una superficie específica elevada serán adsorbentes de interés (El carbón activo es uno de ellos, ya que por ejemplo 1 gramo de este dispone de una superficie de adsorción de más de 1000 m^2).

La operación contraria a la adsorción se llama desorción. Esta operación se realiza comúnmente para la regeneración del lecho sólido colmatado de soluto (y para la recuperación del soluto adsorbido en caso de que este sea interesante económicamente hablando) [1].

1.2. Tipos de Adsorción

La adsorción sobre sólidos puede clasificarse como adsorción física (fisisorción) o química (quimisorción). La línea de división entre ambas no siempre está clara.

1) Según la fortaleza del enlace

- *Física:* Las moléculas se mantienen unidas a la superficie del sólido por medio de fuerzas intermoleculares de Van der Waals relativamente débiles. Se produce cuando las fuerzas atractivas intermoleculares entre un sólido y un gas son mayores que las existentes entre moléculas del gas.
- *Química:* Se produce una reacción química en la superficie del sólido, y el gas se mantiene unido a la misma a través de enlaces químicos relativamente fuertes.

2) Según la especificidad

- *Física:* No es específica. Así nitrógeno se puede adsorber físicamente sobre cualquier superficie, siempre que la temperatura sea suficientemente baja.
- *Química:* Es específica y se presenta sólo cuando a una tendencia a la formación de un compuesto entre el gas y el adsorbente. Así el nitrógeno se quimiadsorbe sobre el Fe, W, Ca y Ti, pero no sobre Ni, Zn, Ag,.. Es de particular importancia en la catálisis.

3) Según el calor de adsorción

- *Física:* Tiene calores de adsorción pequeños, de 1 a 10 kcal/mol (exotérmica), valores que son semejantes a los de condensación.
- *Química:* Presenta grandes calores de adsorción como en las reacciones químicas, del orden de 10 a 200

kcal/mol. Debido a este elevado calor de adsorción, la energía asociada con las moléculas químicamente es significativamente diferente de la asociada con las moléculas presentes en la corriente de gas. Por lo tanto la energía de activación requerida para que reaccionen con otras especies será considerablemente menor, lo que es una explicación del efecto catalítico de las superficies sólidas.

4) Según el número de capas

- *Física:* Se forman multicapas. Cuando el gas B se adsorbe sobre el sólido A, primero se forma una capa completa, pero sigue habiendo interacciones entre la monocapa con las moléculas de B en el gas, conduciendo a la formación de una segunda capa y así sucesivamente.
- *Química:* Se forma una monocapa de gas que cubre completamente la superficie, lo que hace imposible que pueda haber reacciones químicas entre el gas y el sólido.

5) Según la influencia de la temperatura

- *Física:* Sólo se produce, de forma apreciable, a temperaturas inferiores o próximas al punto de ebullición del gas.
- *Química:* Se produce a altas temperaturas.

6) Según la influencia de la presión

- *Física:* Un aumento de la presión produce un aumento de la cantidad adsorbida
- *Química:* Un aumento de la presión disminuye la cantidad adsorbida.

7) Según la reversibilidad

- *Física*: Es reversible. Por ejemplo, el carbón activo es regenerable debido a que se trata de adsorción física.
- *Química*: No es reversible, debido a que se produce ruptura y formación de enlaces.

1.3. Parámetros que influyen en las propiedades de adsorción

Los parámetros a considerar en un proceso de adsorción son los siguientes:

El sistema adsorbente-adsorbato, en lo relativo a:

- 1- Superficie específica y porosidad del sólido.
- 2- Tamaño de partícula.
- 3- Tamaño, estructura y distribución de los poros.

Estos parámetros son muy importantes en las etapas de transferencia de masa por adsorción:

- Difusión del soluto desde el seno de la fase fluida hasta superficie externa del adsorbente.
- Difusión de las moléculas de adsorbato hasta el interior de los poros para alcanzar la superficie libre de los mismos.
- Adsorción de las moléculas de soluto sobre la superficie del sólido, por fuerzas de tipo físico o químico.

En general, la etapa de adsorción es muy rápida en relación con los procesos de difusión. En sistemas hidrodinámicos bien agitados (elevada velocidad relativa entre fases) la difusión externa es muy rápida y resulta cinéticamente controlante el proceso de difusión interna, siendo determinante al respecto, el tamaño de las partículas del adsorbente y el diámetro de poro del mismo.

- 4- Afinidad respecto del adsorbato, que depende de los grupos funcionales existentes en la superficie del adsorbente.
- 5- Presión parcial o concentración del adsorbato en la fase fluida.

La capacidad final del adsorbente para un determinado soluto puede utilizarse, o no, plenamente en las condiciones del proceso real. En el límite, se establece un equilibrio entre la concentración del adsorbato en disolución y la masa del mismo adsorbida por unidad de masa (o de superficie) del adsorbente [2].

Es importante el carácter más o menos polar de las moléculas de adsorbato, así como el tamaño de las mismas. Se puede decir que el soluto se adsorberá más fácilmente cuando la afinidad de aquél por la superficie sea superior a su afinidad por el disolvente. Por tanto, la energía de unión entre la superficie y la sustancia considerada depende de la naturaleza de los solutos que han de adsorberse.

Por ello, hay que conocer los aspectos cinéticos y termodinámicos del proceso, con los mecanismos y las resistencias que los regulan, pues éstas determinan el tiempo de contacto necesario y, así, el tamaño de las instalaciones.

En la tabla 1, se muestran los principales parámetros que influyen en la adsorción:

TABLA 1. PARÁMETROS QUE INFLUYEN SOBRE LAS PROPIEDADES DE LA ADSORCIÓN.

<p>1. <u>Capacidad vs. Cinética</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Los parámetros de capacidad determinan las características de carga del carbón. La capacidad máxima de adsorción del carbón solo se alcanza en el equilibrio. - Los parámetros cinéticos solo determinan la rata de adsorción. Teniendo un efecto despreciable sobre la capacidad de adsorción. <p>2. <u>Área superficial</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de absorción es proporcional al área superficial. <p>3. <u>Tamaño del poro</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - La correcta distribución del tamaño de poros es necesaria para facilitar el proceso de adsorción. <p>4. <u>Tamaño de Partículas</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Partículas pequeñas proveen una más rápida rata de adsorción. 	<p>5. <u>Temperatura</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperaturas bajas aumentan la capacidad de adsorción. <p>6. <u>Concentración del Adsorbato.</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de adsorción es proporcional a la concentración del adsorbato. <p>7. <u>pH</u></p> <p>8. <u>Tiempo de contacto</u></p> <p>9. <u>Cenizas</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Componente inerte del carbón. En la mayoría de los casos las cenizas solubles en agua son las de mayor consideración. <p>10. <u>Densidad Adsorbente</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Es utilizada para indicar la actividad de un volumen de carbón. - Densidad más baja que la teórica del sólido.
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

1.4. Isotermas de Adsorción

La cantidad de adsorbato que puede retener un adsorbente es función de las características, de la concentración del adsorbato y de la temperatura. En general, la cantidad de materia adsorbida se determina como función de la concentración a temperatura constante, y la función resultante se conoce con el nombre de isoterma de adsorción.

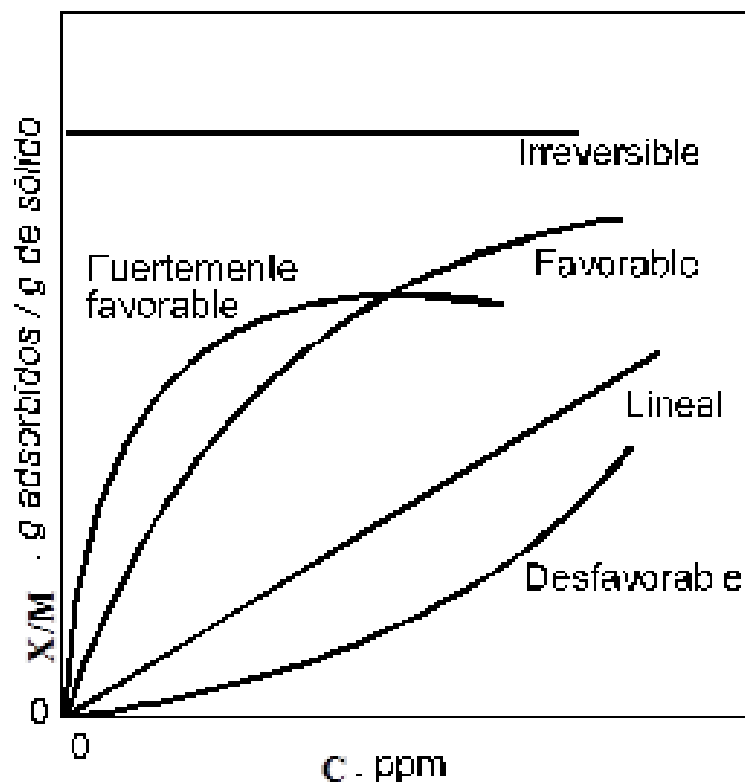


FIG. 1. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.

Representan la relación de equilibrio entre la concentración en la fase fluida y la concentración en las partículas del adsorbente a una temperatura determinada.

Como se puede apreciar en la figura 1, las isotermas que son convexas hacia arriba, se denominan favorables debido a que puede obtenerse una carga relativamente alta del sólido para una baja concentración de fluido. El caso

límite de una isoterma muy favorable es la adsorción irreversible, donde la cantidad adsorbida es independiente de la disminución de la concentración hasta valores muy bajos.

Todos los sistemas presentan una disminución de la cantidad adsorbida al aumentar la temperatura y, por supuesto, el adsorbato puede desorberse aumentando la temperatura, aun para los casos denominado “irreversibles”. Sin embargo, la desorción requiere una temperatura mucho más elevada cuando la adsorción es muy favorable o irreversible que cuando las isothermas responden a un modelo lineal.

Una isoterma que es cóncava hacia arriba recibe el nombre de desfavorable. Estas isothermas son raras, pero resultan interesantes para ayudar a comprender el proceso de regeneración. Si la isoterma de adsorción es favorable, la desorción tiene características similares a la adsorción con isoterma desfavorable.

Las fórmulas más frecuentemente empleadas para el tratamiento de los datos experimentales de las isothermas de adsorción fueron desarrolladas por: Freundlich, Langmuir y por el trío Brunauer, Emmett y Teller (BET).

1.4.1. Isoterma de Freundlich

De todas las fórmulas empleadas para el tratamiento de datos experimentales de las isothermas, la más usual para describir las características de adsorción del carbón activo empleado en el tratamiento de aguas residuales es la isoterma de Freundlich.

La isoterma de Freundlich es la siguiente:

$$X/m = K_f C_e^{1/n} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Dónde:

X/m = cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente (carbón).

C_e = concentración de equilibrio del adsorbato en solución después de la adsorción.

K_f y n = constantes empíricas.

Las constantes de la isoterma de Freundlich se determinan representando gráficamente la relación entre X/m y C , empleando la ecuación anterior reescrita de la siguiente forma:

$$\text{Log} \left(\frac{X}{m} \right) = \log K_f + 1/n \log C_e \quad \text{Ecuación 1'}$$

1.4.2. Isotherma de Langmuir

La isoterma de Langmuir se define de la siguiente manera:

$$\frac{X}{m} = \frac{abC_e}{1 + bC_e} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Dónde:

X/m = cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente (carbón).

a , b = constantes empíricas.

C_e = Concentración de equilibrio de adsorbato en solución después de la adsorción.

Las constantes de la ecuación de Langmuir se pueden determinar dibujando $C/(X/m)$ frente a C empleando la ecuación anterior expresada de la siguiente forma:

$$C_e / (X/m) = 1/ab + 1/aC_e \quad \text{Ecuación 3.}$$

1.4.3. Isoterma BET

La teoría referente a la isoterma BET, responde a sus autores, Brunauer, Emmett y Teller quienes desarrollaron las ideas de Langmuir para describir la adsorción multimolecular o en multicapas.

El modelo para la formación de infinitas capas moleculares conduce a la bien conocida ecuación BET:

$$\frac{p}{n^a(p_0 - p)} = \frac{1}{n_m^a C} + \frac{C - 1}{n_m^a C \left(\frac{p}{p_0}\right)} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Dónde:

n^a y n_m^a es la cantidad adsorbida a la presión de equilibrio p/p_0 y la cantidad adsorbida en la monocapa respectivamente.

C es una constante la que está relacionada proporcionalmente con la fortaleza de la interacción adsorbente-adsorbato y puede usarse para caracterizar la forma de la isoterma BET.

La ecuación anterior de una adecuada descripción para carbones con micro, meso y macroporos sobre un rango limitado de presión relativa, normalmente entre 0.05 y 0.3.

El área de superficie aparente BET (ABET), se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$A_{BET} = (n_m^a)(N)(a_m) \quad \text{Ecuación 5.}$$

Dónde:

N es la constante de Avogadro.

a_m es la sección transversal de la molécula.

La aplicabilidad de la teoría BET a carbones con microporos estrechos puede tener fuertes limitaciones al asumir la adsorción en multicapa, por lo que puede ser inapropiada en poros muy estrechos. Lo que hizo que aparecieran nuevas teorías sobre la adsorción en microporos, que constituye a priori una teoría más realista.

1.5. Adsorbentes

Como se ha explicado, la adsorción consiste en la eliminación de algunos componentes (adsorbatos) de una fase fluida mediante un sólido (adsorbente) que lo retiene. Si la fase fluida es un líquido, la operación se denomina a veces percolación.

Los adsorbentes son materiales naturales o sintéticos de estructura microcristalina, cuya superficies porosas internas son accesibles para la combinación selectiva de sólidos y solutos.

1.5.1. Características de un adsorbente

Las características del adsorbente deben ser:

- Diámetro de partícula entre 50 micras y 20 mm, y generalmente con forma granular. Para hacer mayor la permeabilidad (mínima compacidad) se suele trabajar siempre con tamaños uniformes.
- Elevada área superficial por unidad de peso. Esta propiedad es particularmente importante en adsorción de gases, en la que se tienen en cuenta los poros internos de las partículas. La superficie específica aumentará al disminuir el tamaño de la partícula, aunque disminuye la porosidad. Una solución de compromiso es dar forma esférica a los gránulos pequeños. Por ejemplo el carbón vegetal tiene una superficie específica de 10^5 - 10^6 m²/kg.
- Cierta condición química específica. Por ejemplo, el carbón activo tiene afinidad por hidrocarburos, mientras que el sílica-gel adsorbe agua. Deberán resistir a los adsorbatos y sus disoluciones, y a los agentes

regenerantes, aun a las temperaturas a las que haya de practicarse la regeneración.

- Alta capacidad de adsorción. La relación de equilibrio entre las fases influye en la eficacia con que se alcanza la capacidad final y, en muchos casos, controla la capacidad real del soluto.
- Propiedades físicas y tamaño de partícula. Adecuados para garantizar la necesaria resistencia mecánica y facilidad de manejo, produciendo la menor pérdida de carga posible tanto en lechos fijos como en los móviles o fluidizados.
- Coste bajo, tanto de la materia prima como del proceso de fabricación.
- Fácil regeneración, por desorción, especialmente en el caso de los procesos continuos.

Deben de tener ciertas propiedades relativas a la ingeniería.

- Así si utiliza en un lecho fijo, no debe ofrecer una pérdida de carga muy grande, ni deben ser arrastrados con facilidad.
- Debe tener una adecuada consistencia para que no se reduzca su tamaño al ser manejado y para que no se rompa al soportar su propio peso. Debe ser indeformable y no hincharse con los líquidos con los que se vaya a emplear.
- Si se va a sacar y meter con frecuencia de los recipientes que lo contienen debe fluir libremente.

1.5.2. Tipos de adsorbentes

Los adsorbentes más empleados son el gel de sílice, la alúmina, el carbón activo y determinadas resinas sintéticas [3].

Según su composición o naturaleza los adsorbentes se pueden clasificar en:

- Minerales: El carbón, la alúmina y otros óxidos de minerales activados (aluminosilicatos, arcillas, gel de sílice,...); pueden presentar una gran superficie específica, pero únicamente algunas sustancias tienen buena afinidad hacia ellos; por lo tanto, son adsorbentes muy específicos.
- Orgánicos: Resinas macromoleculares de superficies específicas comprendidas entre 300-500 m²/g; sus capacidades son mediocres con relación a la de los carbones activos; por el contrario, estas resinas tienen mejor cinética de adsorción y generalmente son más fáciles de regenerar. Como desorbentes se suelen utilizar ácidos, bases y disolventes orgánicos miscibles en el agua.

2. CARBÓN ACTIVO

2.1. Antecedentes Históricos

El uso de los materiales de carbón se pierde en la historia, de forma que es prácticamente imposible determinar con exactitud cuando el hombre comenzó a utilizarlos. Lo cierto es que antes del uso de lo que en la actualidad se denominan carbones activos, es decir carbones con una estructura porosa altamente desarrollada, ya se empleó como adsorbente el carbón vegetal, o simplemente maderas parcialmente desvolatilizadas o quemadas.

Los primeros usos de estos primitivos carbones activos, generalmente preparados a partir de madera carbonizada (carbón vegetal), parecen haber tenido aplicaciones médicas, así, en Tebas (Grecia) se halló un papiro que data del año 1550 a.C. en el que se describe el uso de carbón vegetal como adsorbente para determinadas prácticas médicas. Posteriormente, en el año 400 a.C., Hipócrates recomienda filtrar el agua con carbón vegetal para eliminar malos olores y sabores y para prevenir enfermedades. En relación al tratamiento del agua con carbón activo, se sabe que en los barcos fenicios, año 450 a.C., se almacenaba el agua para beber en barriles con la madera parcialmente carbonizada por su cara interna. Esta práctica se continuó hasta el siglo XVIII como medio para prolongar el suministro de agua en los viajes transoceánicos.

La primera aplicación documentada del uso de carbón activo en fase gas no tiene lugar hasta el año 1793, cuando el Dr. D. M. Kehl utiliza el carbón para mitigar los olores emanados por la gangrena. El mismo doctor también recomienda filtrar el agua con carbón vegetal.

La primera aplicación industrial del carbón activo tuvo lugar en 1794, en Inglaterra, utilizándose como agente decolorante en la industria del azúcar. Esta aplicación permaneció en secreto durante 18 años hasta que en 1812 apareció la primera patente. En 1854 tiene lugar la primera aplicación a gran escala del carbón activo en fase gas, cuando el alcalde de Londres ordena instalar filtros de carbón vegetal en los sistemas de ventilación de cloacas. En 1872 aparecen las primeras máscaras con filtros de carbón activo utilizadas en la industria química para evitar la inhalación de vapores de mercurio.

El término adsorción no fue utilizado hasta 1881 por Kayser para describir como los carbonizados atrapaban los gases. Aproximadamente por esas fechas R. Von Ostrejko, considerado el inventor del carbón activo, desarrolla varios métodos para producir carbón activo tal y como se conoce en nuestros días, más allá de simples carbonizados de materiales orgánicos o el carbón vegetal.

Así, en 1901 patentó dos métodos diferentes para producir carbón activo. El primero consistía en la carbonización de materiales lignocelulósicos con cloruros de metales; lo cual resultó la base de lo que hoy en día es la activación química. En el segundo, proponía una gasificación suave de materiales previamente carbonizados con vapor de agua o CO_2 , es decir, una activación física, o más correctamente térmica.

La primera guerra mundial, y el uso de agentes químicos durante esta contienda, trajeron como consecuencia la necesidad urgente de desarrollar filtros de carbón activo para máscaras de gas. Sin duda este acontecimiento fue el punto de partida para el desarrollo de la industria del carbón activo, y de un buen número de carbones activos usados no sólo en la adsorción de gases tóxicos sino en la potabilización

de agua. A partir de este momento, tuvo lugar el desarrollo de multitud de carbones activos para aplicaciones más diversas:

- Depuración de gases y aguas.
- Aplicaciones médicas.
- Soporte de catalizadores.
- Etc.

Desde los años 30 se usó para eliminar el sabor y olor del agua, y desde entonces hasta nuestros días el carbón activo se ha utilizado de manera extensiva en muchas industrias, para eliminar o recuperar compuestos orgánicos como tintes o disolventes de las aguas o purificar el aire, así como en las plantas potabilizadoras, donde se usan los lechos de carbón activo para la depuración del agua de suministro urbano.

En la actualidad está ampliamente implantado el empleo de carbón activo en diversos campos de la industria tales como la industria de los azúcares, la industria química, la industria farmacéutica, etc. Y además, se está incrementando su uso cada vez más en el tratamiento de aguas residuales, potables y en procesos industriales, ya que, el carbón activo, es la sustancia adsorbente por excelencia. Esta elevada capacidad de adsorción de diversas sustancias, junto con la gran facilidad y rapidez de eliminación del medio tratado y la posibilidad de, una vez agotado, ser regenerado para su reutilización, permite un tratamiento eficaz y barato en múltiples aplicaciones, en muchas de las cuales es un producto insustituible.

2.2. Concepto de Carbón

El carbón (figura 2) es un mineral de origen orgánico constituido básicamente por carbono. Su formación es el resultado de la condensación gradual de la materia de plantas parcialmente descompuestas a lo largo de millones de años. Las plantas al descomponerse forman una capa llamada turba.



FIG. 2. CARBÓN.

Hay tres tipos básicos de carbón:

- **Lignito:** Se forma una vez comprimida la turba. Es el carbón de menor valor calórico, porque se formó en épocas más recientes y contiene menos carbón (30%) y más agua. Es una sustancia parda y desmenuzable en la que se pueden reconocer algunas estructuras vegetales.
- **Hulla:** Se origina por la compresión del lignito. Tiene un importante poder calorífico por lo que se utiliza en las plantas de producción de energía. Es dura y quebradiza, de color negro. La concentración de carbono está entre el 75 y el 80%.
- **Antracita:** Procede de la transformación de la hulla. Es el mejor de los carbones, muy poco contaminante y de alto poder calorífico. Arde con dificultad pero desprende mucho calor y poco humo. Es negro,

brillante y muy duro. Tiene una concentración de hasta el 95% de carbono.

Con el término genérico de carbón se conoce a los compuestos que tienen en su composición al elemento carbono (C), ordenado regularmente. Los átomos situados en la parte exterior de la estructura cristalina disponen de fuerzas de atracción libre, lo que les permite atraer compuestos existentes en su inmediato alrededor (figura 3).

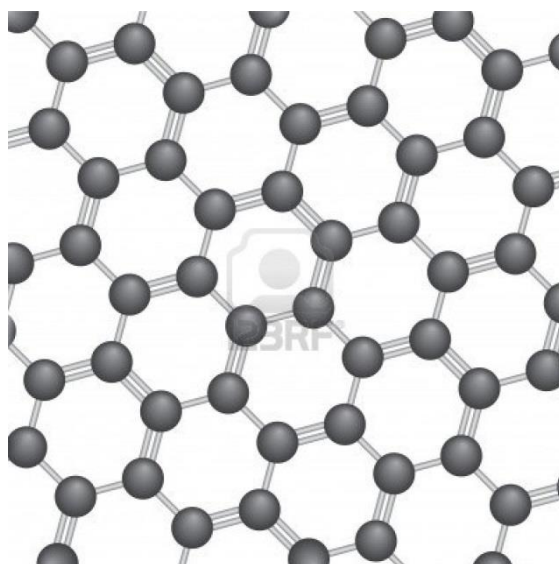


FIG. 3. ESTRUCTURA ATÓMICA DEL CARBÓN.

Todos los átomos de carbón de una estructura cristalina se atraen unos a otros, adquiriendo una estructura ordenada.

Una de las maneras más sencillas de diferenciar los carbones que se encuentran en la naturaleza de aquellos que son fabricados por el hombre, es de acuerdo al grado del ordenamiento de sus átomos. En el extremo de mayor orden se encuentra el diamante, poco antes de éste el grafito. De acuerdo con esto un carbón estará más ordenado mientras su proceso de formación se haya llevado a cabo a mayor temperatura y a mayor tiempo.

2.3. Concepto de Carbón Activo

Es conveniente analizar primero el proceso de adsorción, para así comprender mejor como el carbón activo realiza su función. La adsorción es un proceso por el cual los átomos en la superficie de un sólido, atraen y retienen moléculas de otros compuestos. Estas fuerzas de atracción son conocidas como “Fuerzas de Van Der Waals”. Por lo tanto al ser un fenómeno que ocurre en la superficie mientras mayor área superficial disponible tenga un sólido, mejor adsorbente podrá ser.

El carbón activo es un adsorbente preparado a partir de materiales carbonosos que se caracteriza por poseer una alta superficie interna, variedad de grupos funcionales y una buena distribución de poros (figura 4). Propiedades que le permiten atrapar una gran diversidad de moléculas [4].

Es un carbono inerte y micro-poroso con una gran superficie interna (desde 600 y hasta 1500 m²/g.), medida por adsorción de nitrógeno. Esa superficie puede adsorber moléculas orgánicas de líquidos y de gases ya que las moléculas impuras se adhieren a esa superficie.

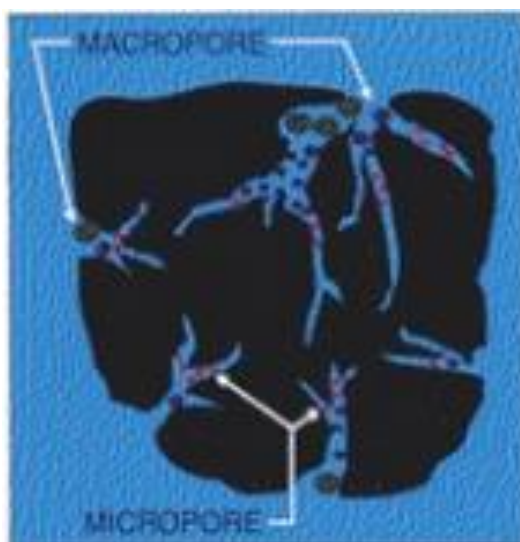


FIG. 4. ESTRUCTURA POROSA DEL CARBÓN ACTIVO.

Por otro lado, se caracteriza por una cantidad grande de micro-poros (poros menores a 2 nanómetros). El proceso de activación actúa eficientemente al mejorar y aumentar el área superficial.

Desde el punto de vista de la composición química, el carbón activo es prácticamente puro, al igual que el diamante, el grafito, el negro de humo, y los diversos carbones minerales, o de leña. La diferencia fundamental entre uno y otro tipo de carbón radica en la estructura de sus átomos. En el caso del carbón activo, estos se encuentran combinados en forma de placas grafíticas, que pueden representarse de acuerdo a la figura 5.

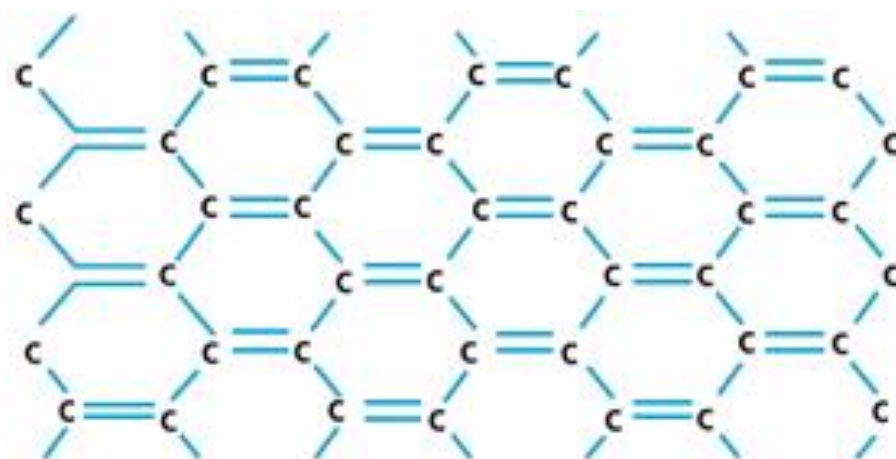


FIG. 5. ESTRUCTURA ATÓMICA DEL CARBÓN ACTIVO.

Las placas están separadas y tienen distintas orientaciones, por lo que existen espacios entre ellas, a los que se denominan poros, que brindan al carbón activo su principal característica: su gran área superficial, y por lo tanto, una alta capacidad adsorbente [5].

2.4. Propiedades

El carbón activo posee una estructura micro-cristalina laminar formada por capas paralelas de átomos de carbono ordenados en hexágonos regulares, que recuerda a la del grafito. Sin embargo, las regiones cristalinas del carbón activo son del orden de 100 veces menores que las del grafito y están orientadas al azar (no apiladas) y unidas a través de grupos alifáticos puente que contiene hidrógeno y fundamentalmente oxígeno. Este desordenamiento microcristalino trae consigo la existencia de huecos de distintos tamaños (poros) y que presente una alta superficie para retener moléculas de una fase fluida, líquida o gaseosa [6].

Por eso, la elevada capacidad de eliminación de sustancias y baja selectividad de retención, son las dos características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activo.

La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, si bien porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante, estos serán explicados en el apartado de características.

Por otra parte, el carbón activo tiene escasa especificidad ante un proceso de retención, es un adsorbente “universal”.

2.4.1. Adsorbente Universal

El carbón activo tiene escasa especificidad ante un proceso de retención, es lo que se llama, adsorbente universal. No obstante, por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, retendrá preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molecular (hidrocarburos, fenoles, colorantes...), mientras que sustancias como el nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no se retienen por el carbón a temperatura ambiente, de ahí que un gran porcentaje de su uso, este destinado a la eliminación de contaminantes procedentes de sectores muy variados, tanto en fase gas (sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno. Vapores de gasolina...) como líquida (aguas potables, industriales y residuales, tintorerías...).

Las propiedades adsorbentes de un carbón activo no dependen únicamente de la superficie y porosidad. En el caso del carbón activo, el nivel de actividad de la adsorción depende de la concentración de la sustancia en el agua, la temperatura y la polaridad de la sustancia. Una sustancia polar (o lo que es lo mismo soluble en agua) no puede ser eliminada o es mal eliminada por el carbón activo (superficie apolar). En estos casos, la fijación al carbono de "heteroátomos", principalmente oxígeno e hidrógeno, formando estructuras o grupos funcionales tipo ácido carboxílico, lactonas, carbonilo, etc., eleva la afinidad de las sustancias polares por la superficie del adsorbente, pudiendo imprimir un carácter ácido-base al carbón.

Finalmente, cuando la sustancia a eliminar tiene una polaridad apreciable, bajo volumen molecular, y está muy diluida en aire la retención a temperatura ambiente por el carbón solo es efectiva si se impregna con reactivos

específicos o se aprovechan las propiedades catalíticas del carbón. De esta manera, tras la adsorción se producen unas reacciones químicas que transforman los productos tóxicos en inertes que se desorben o quedan retenidos en la porosidad del carbón.

2.4.2. Carácter hidrófobo

Por otra parte, todos los carbones presentan un carácter hidrófobo, no obstante se puede disminuir este carácter hidrófobo adicionando grupos superficiales polares. Esto puede conseguirse por oxidación con algún tipo de agente oxidante. Los grupos oxigenados dan lugar a centros primarios de adsorción de moléculas de agua que a su vez adsorberán nuevas moléculas por formación de puentes de hidrógeno. De esta forma se aumenta el carácter hidrófilo de los carbones. En el caso de adsorción de compuestos inorgánicos en fase acuosa es fantástico. Sin embargo, en el caso de que el carbón activo vaya a ser usado para adsorber compuestos en fase gas, el hecho de que los poros estén ocupados, o incluso bloqueados por moléculas de agua puede llegar a disminuir sustancialmente la capacidad de adsorción del carbón. Este efecto combinado oxidación/adsorción de humedad de los carbones activos se conoce como efecto de envejecimiento (*aggeing effect*) y es algo a evitar, sobre todo en aplicaciones con fase gas.

2.4.3. Naturaleza Anfótera

Faceta importante de la química superficial de un carbón activo, lo cual significa que en la superficie del carbón coexisten grupos superficiales de carácter ácido y grupos superficiales de carácter básico. El que un carbón sea globalmente ácido o básico dependerá tanto de la

concentración de estos grupos como de la fuerza como ácido o base de los mismos (véase figura 6).

Así pues, los grupos ácidos tienden a liberar protones, especialmente en los medios básicos, mientras que los grupos básicos tienden a captarlos cuando se encuentran en un medio ácido. De esta forma pueden aparecer cargas positivas o negativas en la superficie del carbón. De forma genérica: si el pH del medio es mayor que el punto de carga cero del carbón (pH_{PZC} , punto o pH en el cual el número de cargas positivas es igual al número de cargas negativas, de forma tal que la carga neta sobre la superficie del carbón es cero), se tendrá un predominio de las cargas negativas en la superficie del carbón. Por el contrario, si $\text{pH} < \text{pH}_{\text{PZC}}$ se obtendría una superficie cargada positivamente. Las condiciones en las que un carbón tenga una carga neta negativa serán preferibles para adsorber cationes y aquellas en las que presente una carga neta positiva lo serán para adsorber aniones. Dado que el modificar el pH de los efluentes contaminantes no siempre resulta sencillo, es preferible optimizar la química superficial del carbón activo.

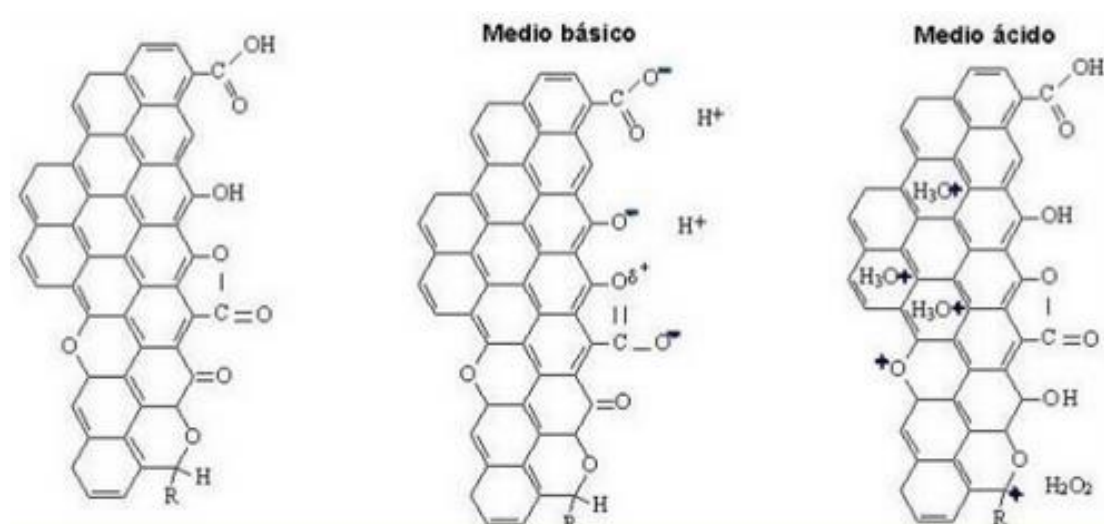


FIG. 6. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL CARÁCTER ÁCIDO DE ALGUNOS GRUPOS OXIGENADOS Y DEL CARÁCTER BÁSICO DE LOS ELECTRONES DESLOCALIZADOS DEL PLANO BASAL Y DE GRUPOS OXIGENADOS.

2.5. Características

El término carbón activo engloba un amplio espectro de materiales constituidos fundamentalmente por carbono (75-80%), que se preparan especialmente para que tengan una alta superficie interna y una elevada porosidad.

El análisis químico de un carbón activo revela que además de carbono, contiene pequeñas cantidades de hidrógeno (0.5% aprox.) y oxígeno (6% aprox.), enlazados químicamente, formando grupos funcionales como carbonilos, carboxilos, fenólicos, lactonas y grupos éteres, y según su proporción imprimen al carbón un carácter ácido o básico. Otras sustancias que contiene el carbón activo son materias minerales (del orden del 10%), como carbonatos y fosfatos de metales alcalinos y alcalinotérreos, junto con sílice. También contienen cenizas (entre 5-10% aprox.).

En la tabla 2 se muestran las principales características especificadas para carbón activo granular que se destina al tratamiento de agua. Algunos de éstos, como el número de yodo, el contenido de cenizas totales, los solubles en agua, la humedad y el pH, se aplican también para el carbón activo en polvo.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DEL CARBÓN ACTIVO COMERCIAL.

PARÁMETRO	UNIDADES EN LAS QUE SE EXPRESA	RANGO DE VALORES TÍPICOS
Número de yodo	mg/g de carbón	500 a 1,200
Área superficial	m ² /g	500 a 1,200
Radio medio de poro y volumen total de poro	nm y cm ³	0.7 a 500.0 y 0.2 a 1.0
Densidad aparente	g/cm ³	0.26 a 0.65
Dureza	Adimensional	30 a 99
Rango de tamaño de partícula	Malla estándar americana (U.S. Std Sieve)	4x8 a 20x50
Tamaño efectivo de partícula	mm	0.4 a 3.3
Coefficiente de uniformidad	Adimensional	menor a 2.1
Contenido de cenizas totales	% base seca	3 a 15
Solubles en agua	% base seca	0.5 a 7
pH del extracto acuoso	pH	2 a 11
Humedad (al empacar)	%	2 a 15
Longitud de semidecloración	cm	2 a 10

2.5.1. Estructura Porosa

Como se ha dicho, la estructura micro-cristalina del carbón activo recuerda a la del grafito, dando una estructura de poros bien determinada.

Así, se pueden distinguir tres tipos de poros de acuerdo a la terminología de la IUPAC, la cual se basa en el diámetro de los poros:

- Microporos: Menores a 2 nm.
- Mesoporos: Entre 2 y 50 nm.
- Macroporos: Mayores de 50 nm (típicamente 200 a 2000 nm.).

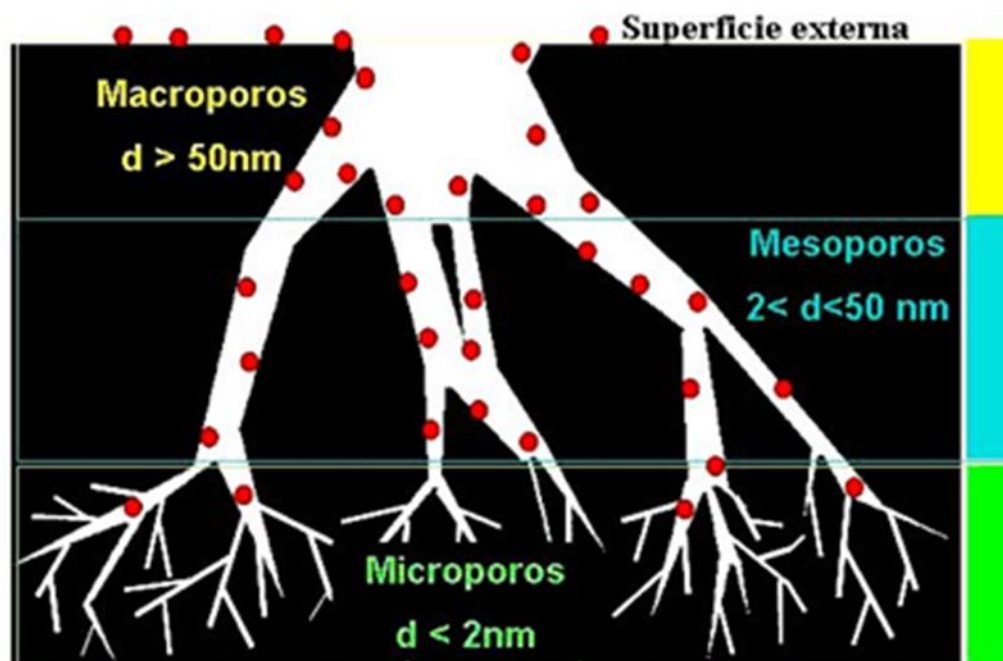


FIG. 7. CLASIFICACIÓN DE LOS POROS POR DIÁMETRO.

La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, si bien porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante. En general, los Microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los Mesoporos y Macroporos son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y para favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido.

Como se ve en la figura 7, los Microporos tienen un tamaño adecuado para retener moléculas pequeñas, que aproximadamente corresponden a compuestos más volátiles que el agua, tales como olores, sabores y muchos solventes.

Los Macroporos atrapan moléculas grandes, tales como las que son coloreadas o las sustancias húmicas (Ácidos húmicos y fúlvicos) que se generan al descomponerse la materia orgánica.

Los Mesoporos son los apropiados para moléculas intermedias entre las anteriores.

Por lo tanto la capacidad de un carbón activo para retener una sustancia determinada, no solo está dada por su área superficial, sino por la proporción de poros cuyo tamaño es el adecuado, de una a cinco veces el diámetro de la molécula de dicha sustancia.

La distribución del tamaño del poro depende fundamentalmente de tres factores: el origen de la materia prima, el tipo de activación, y la duración del proceso de activación.

Los carbones activos, pueden presentar elevadas superficies específicas, del orden de $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ e incluso llegar a los $3000 \text{ m}^2/\text{g}$. Los elevados valores de superficie específica se deben en gran medida a la porosidad que presentan los materiales carbonosos, siendo los Microporos los que mayor contribución tienen en la superficie específica. En principio, cabría pensar que a mayor superficie específica mejores serán las características como adsorbente del carbón activo, puesto que también se debería tener un mayor número de centros para adsorber el adsorbato. Sin embargo, esto no es siempre cierto, ya que se ha de tener en cuenta el posible "efecto de tamiz molecular".

El "tamiz molecular" es un material que contiene poros pequeños de un tamaño preciso y uniforme que se usa como agente adsorbente para gases y líquidos. Las moléculas que son lo suficientemente pequeñas para pasar a través de los poros son absorbidas, mientras que las moléculas mayores no. A diferencia de un filtro, el proceso opera a nivel molecular.

Los poros se pueden clasificar de acuerdo a su disponibilidad a un fluido externo:

- Poros cerrados: Se encuentran aislados unos de otros. Afectan a las propiedades macroscópicas como la densidad, fortaleza mecánica y conductividad térmica, pero son inactivos en procesos como flujo de fluidos y adsorción de gases.
- Poros abiertos: Poseen canales continuos de comunicación con la superficie externa del material.

Las geometrías de los poros son muy diversas (véase figura 8), aunque las más frecuentes en carbón activo son:

- Poros Cilíndricos.
- Poros en forma de rendija o hendidura (los más comunes en carbón activo).
- Espacios o huecos entre esferas de sólido conectadas.
- Poros en forma de bote de tinta.
- Poros en forma de embudo.

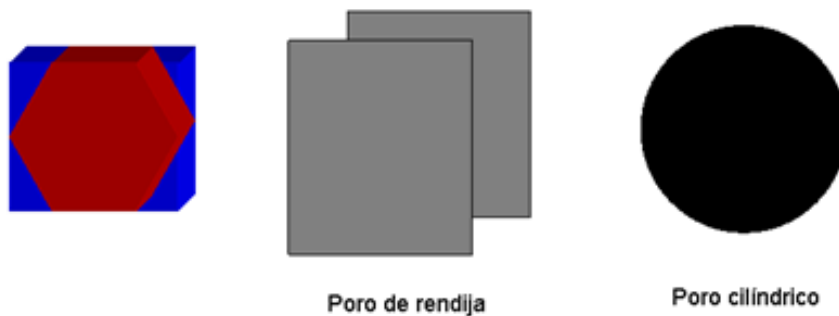


FIG. 8. TIPOS DE GEOMETRÍA DE POROS.

El carbón activo tiene una gran variedad de tamaños de poros los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su función, en ***poros de adsorción*** y ***poros de transporte***.

Los primeros consisten en espacios entre placas gráficas con una separación de entre una y cinco veces el diámetro de la molécula que va a retenerse. En estos poros, ambas placas de carbón están lo suficientemente cerca como para ejercer atracción sobre el adsorbato y retenerlo con mayor fuerza.

Los poros mayores que los de adsorción son de transporte, y tienen un rango muy amplio de tamaños, que van hasta el de las grietas que están en el límite detectable por la vista, y que corresponde a 0.1 mm. En esta clase de poros, solo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato y entonces lo hace con una fuerza menor, o incluso insuficiente para retenerlo. Actúan como caminos de difusión por los que circula la molécula hacia los poros de adsorción en los que hay una atracción mayor. Por lo tanto, aunque tienen poca influencia en la capacidad del carbón activo, afectan la cinética o velocidad con la que se lleva a cabo la adsorción [7].

2.5.2. Número de yodo y área superficial

El número de yodo es un índice del área superficial de un carbón activo. Esto se debe a que el yodo se adsorbe con mucha eficiencia en una capa monomolecular y su tamaño le permite alojarse hasta en los poros más pequeños en los que se lleva a cabo la adsorción. Por lo tanto, la cantidad de yodo adsorbido es proporcional al área del carbón. Hay que señalar una coincidencia afortunada que consiste en que el número de yodo, que se expresa en mg/g –miligramos de yodo adsorbidos por gramos de carbón-, tiene un valor aproximadamente igual al del área superficial obtenida por el método BET de adsorción de N_2 , expresada en m^2/g .

La ejecución del método BET requiere de tiempo así como de equipos y materiales caros. En cambio, el análisis del número de yodo es rápido, barato y se puede realizar en cualquier laboratorio que cuente con el equipo más básico de cristalería. Por lo tanto, este último suele utilizarse como la principal herramienta de control de calidad en la producción de carbón activo y como método de evaluación que puede realizar el comprador.

Por otro lado, el número de yodo disminuye en proporción al grado de saturación del carbón activo. En general, el carbón requiere cambiarse cuando el número de yodo llega al 50% de su valor original; por lo tanto, este parámetro puede utilizarse para estimar el tiempo de vida útil que resta a un carbón en uso.

2.5.3. Rango de tamaño de partícula, tamaño efectivo de partícula y coeficiente de uniformidad

El rango de tamaño de partícula es el número de las dos mallas -estándar americanas- que encuadran todo el rango de partículas que conforman un lote de carbón activo granular. Por ejemplo, 20x50 significa que las partículas de carbón pasan por la malla 20 y se retienen en la 50. Normalmente el fabricante especifica que más de 90% de su producto está dentro de dicho rango. Mientras menor es el tamaño de partícula, el carbón activo granular adsorbe con mayor rapidez, aunque ocasiona una mayor caída de presión. La malla 80 suele considerarse como la frontera entre carbón activo granular y carbón activo en polvo.

Hay que hacer notar que puede haber grandes diferencias entre dos carbones con el mismo rango de tamaño de partícula nominal. Esto se debe a que uno puede tender más hacia los gruesos y el otro hacia los finos, manteniéndose ambos dentro del rango especificado. Para evitar estas diferencias, se especifican otras dos variables que son el tamaño efectivo de partícula y el coeficiente de uniformidad. La primera corresponde a la abertura de la malla por la que pasa 10% del carbón activo granular y se expresa en mm o en pulgadas; la segunda es el resultado de dividir la abertura de la malla por la que pasa 60% del carbón entre la abertura de la malla por la que pasa 10%, y es adimensional.

En cuanto al tamaño efectivo de partícula, no se especifica un rango si no que se deja abierto para cada caso, puesto que no depende de la presión disponible para el flujo y de la necesidad –o no- de que el carbón activo granular realice una función de filtración.

2.5.4. Contenido de cenizas totales y número de solubles en agua

Son el residuo que queda después de calcinar el carbón a 650 °C, hasta llegar a peso constante, y se expresan en términos de porcentaje en base seca. La cantidad y composición de las mismas puede influir en la adsorción y en ciertas propiedades del carbón activo.

Es posible disminuir su presencia en el carbón mediante lavados con ácido, lo que se hace en el caso de procesos que se ven afectados por ellas. Como ejemplo está el carbón activo granular que se utiliza en la recuperación de solventes del aire. Al tener un menor contenido de cenizas, aumenta su temperatura de ignición, disminuyendo el riesgo de que ésta suceda, debido a que las cenizas son óxidos de sodio, potasio y de otros metales, que actúan como chispa y provocan la ignición de la cama de carbón saturado.

En el caso de tratamiento de agua, la desventaja fundamental de las cenizas consiste simplemente en que mientras mayor es su porcentaje, menor es la cantidad de carbón realmente efectivo.

Algunas de las cenizas se disuelven en agua. En ciertas aplicaciones, el producto tratado con el carbón puede afectarse con la cantidad y el tipo de estas sustancias. Tal es el caso de la decoloración de glucosa y de la eliminación de cafeína del café. En el caso de tratamiento de agua, esta propiedad puede cobrar importancia cuando afecta al pH.

2.5.5. pH del extracto acuoso

Los solubles en agua pueden tener carácter ácido o básico. Por ejemplo, en el caso de un carbón que se activa con ácido fosfórico, el producto que sale del proceso de fabricación tiene fosfatos que al disolverse en agua se convierten en ácidos y por lo tanto disminuyen el pH. En otro ejemplo, un carbón activo de concha de coco, aunque se activa con vapor de agua y sin la intervención de reactivos químicos, contiene sodio y potasio en forma de óxidos, que provienen de la misma materia prima; al disolverse en agua, éstos forman hidróxidos que aumentan el pH de la misma.

Si el pH del extracto acuoso es igual al del agua que va a tratarse, no ocurre alteración en esta última. Cuando es diferente, solamente se modificará el pH de los primeros litros tratados; sin embargo en algunos fabricantes ofrecen carbones con valores de pH similares al del líquido que va a tratarse. En su defecto, el usuario puede agregar un ácido o un álcali e inundar al carbón activo granular en agua hasta lograr el pH requerido, o bien, puede lavar el carbón hasta eliminar los solubles que modifican el pH; este último método puede llegar a requerir grandes volúmenes de agua.

2.5.6. Otras características

Radio medio de poro

Es función básicamente del tipo de materia prima y se ve poco afectado por las condiciones del proceso. El método analítico para obtener su valor es caro y lento y por eso no se evalúa con frecuencia, aunque los productores de carbón activo normalmente sí reportan su valor. Es una de las variables que más pesan en la selección de un carbón. Suele reportarse en nm.

Volumen total de poro

Esta variable se expresa en ml/g y es función tanto del tipo de materia prima, como del grado de activación. Es decir, su valor depende del radio medio de poro y del área superficial del carbón. El método analítico para determinarlo es el mismo que se utiliza en el caso del radio medio de poro y, por las razones ya expuestas, tampoco se evalúa con frecuencia. Al igual que el área superficial y que el número de yodo, es un parámetro indicador de la capacidad de un carbón activo.

Densidad aparente

Es el peso en g/cm³ de carbón totalmente seco en aire. Es decir, incluye el volumen de los poros y el de los espacios entre las partículas de carbón. Esta variable es la base para determinar el volumen de cama necesaria para contener una determinada más de carbón activo granular. Su valor determina en gran parte el flujo de agua necesario para lograr un buen retrolavado del carbón.

Dureza

Existen varios métodos para evaluarla, aunque desafortunadamente ninguno de ellos simula las condiciones reales que provocan la erosión y el rompimiento del carbón en las diferentes etapas de su uso, como el transporte y el retrolavado.

La mayoría de los métodos reportan resultados de dureza cuyo valor está entre 0 y 100. El de la ASTM D-3802 (norma seguida en la valoración) consiste en agitar la muestra de carbón junto con balines de acero. Después de 30

min se mide el porcentaje en peso de carbón que queda sobre una malla cuya abertura es lo más cercano posible a la mitad de la abertura de la malla que define el mínimo tamaño de partícula nominal de la muestra original. El resultado se reporta como valor de dureza.

Humedad (al empaquetar/empacar)

Ésta se especifica ya que mientras mayor es su contenido, menor es el porcentaje de carbón neto que recibe el comprador.

Longitud de semidecloración

Es la profundidad de cama requerida para disminuir el contenido de cloro libre en agua pura de 5 a 2.5 mg/l. se utiliza como una medida de la velocidad con la que el carbón activo granular declora. Mientras menor es el tamaño de partícula, mayor es la velocidad de decloración y por lo tanto menor es la longitud de semidecloración.

2.6. Tipos de carbones activos

Independientemente de la materia prima de partida y del método de obtención, los productos de carbón activo se clasifican en función de su granulometría en dos tipos distintos:

- Carbón Activo en Polvo (CAP), con un tamaño de grano inferior a las 300 μm .
- Carbón Activo Granular (CAG), con un tamaño de grano típico de 1 – 3 mm.

Los carbones activos en polvo proceden de un precursor granular intermedio, ya que no hay ningún método de obtención de carbones activos que esté basado en un precursor en polvo. Este polvo se produce mediante técnicas de impacto, como trituración y tamización de un producto anteriormente granular. Las diferencias existentes en la distribución de tamaños de partícula dependen de la aplicación futura que tendrán estos carbones activos. Por otro lado, los carbones activos granulares se clasifican en dos tipos:

- Los molidos previamente al proceso de obtención.
- Los molidos posteriormente al proceso de obtención.

La mayoría de las aplicaciones de adsorción de gases o vapores utilizan formas granuladas de carbones activos, que permiten pasar un flujo de corriente gaseosa suficiente sin crear excesivas pérdidas de presión a su través.

2.6.1. Carbón Activo en Polvo (CAP)

El carbón activo en polvo generalmente se utiliza en combinación con los tratamientos de clarificación. Inyectado de forma continua en el agua con reactivos de floculación, se introduce en los flóculos y seguidamente se extrae del agua con ellos. Para esta extracción, se recomienda a veces recurrir a una filtración directa, si bien es preferible utilizar un decantador de recirculación de fangos o, mejor aún, de lecho de fangos. Con estos aparatos se aumenta notablemente el tiempo de contacto entre el agua y el carbón y, por lo tanto, se consigue una mejor aproximación al equilibrio. Otra forma de aplicación es añadir carbón activo en polvo al efluente del tratamiento biológico. El carbón, en este caso, es añadido al efluente en un tanque de contacto. Una vez transcurrido el tiempo deseado se deja que el carbón sedimente en el fondo del tanque y seguidamente se extrae del mismo el agua tratada. Puesto que el carbón está pulverizado, puede necesitarse un coagulante para facilitar la eliminación de las partículas de carbón, o bien requerirse una filtración a través de filtros rápidos de arena [8].

Como se ha indicado, el carbón activo puede utilizarse igualmente para afino de aguas industriales de elevada pureza (tratamiento de condensados, agua de aclarado en la industria electrónica, etc.).

Propiedades físicas más importantes

Las propiedades físicas de un carbón activo en polvo (PAC) más importantes son la filtrabilidad (cualidad de filtrar, que mide la capacidad o no de ser filtrado un determinado material) y la densidad global o aparente. Si el carbón atraviesa un filtro, contamina el agua tratada, La capacidad de un carbón para ser separado por filtración se controla a través de la forma de sus partículas y de la distribución de tamaños. La densidad global, mayor capacidad para eliminar un adsorbato por unidad de volumen de adsorbente.

Ventajas

- Los carbones activos en polvo son, aproximadamente, de dos a tres veces más baratos que los carbones granulares.
- Pueden dosificarse en exceso, en caso de puntas de contaminación.
- Precisan inversiones reducidas. Cuando el tratamiento consiste sólo en una etapa de floculación-decantación basta prever un simple equipo de dosificación de carbón activo.
- Su cinética de adsorción es rápida, puesto que su superficie es fácilmente accesible.
- El carbón activo favorece la decantación, al espesar el floculo.

Desventajas

- El carbón activo no puede regenerarse cuando se recuperan en mezcla de fangos de hidróxidos, por lo que debe preverse la pérdida de este material después de su utilización. Cuando se utiliza carbón activo sólo (en ausencia de coagulantes minerales) puede recurrirse a la técnica de regeneración en lecho fluidizado que, sin embargo, conlleva pérdidas muy elevadas.
- Es difícil eliminar las últimas trazas de impurezas, sin añadir un exceso de carbón activo.

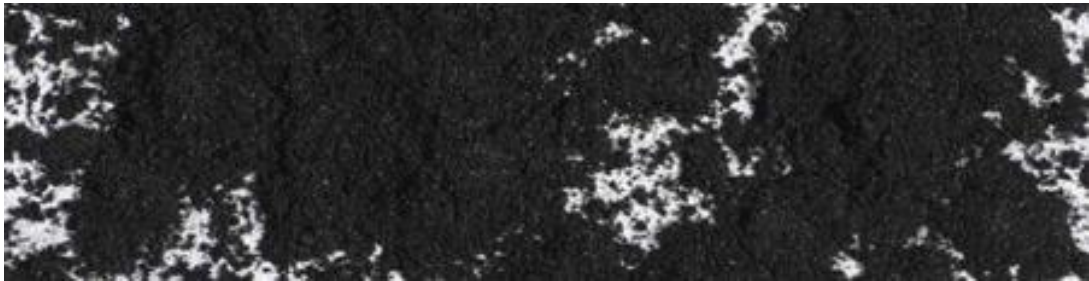


FIG. 9. CARBÓN ACTIVO EN POLVO.

2.6.2. Carbón Activo Granular (CAG)

Los Carbones Activos Granulares pueden dividirse en dos categorías:

- a) Carbón activo troceado (o sin forma).
- b) Carbón activo conformado (con forma, ya sea, cilíndrica, disco, etc.).

Los carbones activos troceados se obtienen por molienda, tamizado y clasificación de briquetas de carbón o de trozos más grandes. Los carbones conformados pueden obtenerse por peletización o por extrusión de carbón en polvo mezclado con distintos tipos de aglomerantes. Existen además otras formas adsorbentes de carbón, como las fibras de carbón activadas, las telas y los filtros de carbones activos, las estructuras monolíticas, las membranas de carbón, etc.

El carbón en grano se utiliza en forma de lecho filtrante atravesado por el agua a tratar, cuyas impurezas se someten así a una extracción metódica. En efecto, el agua, progresivamente liberada de sus contaminantes, encuentra fracciones de carbón activo cada vez menos saturadas y, por lo tanto, cada vez más activas [9].



FIG. 10. TIPOS DE CARBÓN ACTIVO GRANULAR.

Actualmente, se está investigando la utilización del reactor de lecho fluidizado para la obtención de carbonizados granulares. Estos reactores poseen una eficacia muy elevada, pero presentan una elevada velocidad de calefacción de las partículas [10].

Propiedades físicas más importantes

Para los carbones activos granulares (CAG) las propiedades físicas más importantes son la dureza y el tamaño de partícula. Buena parte del costo de operación con los carbones en grano se debe a las pérdidas por atrición durante el manejo y la regeneración. Las pérdidas son menores en los carbones más duros. También la friabilidad (cualidad de friable, la cual valora la facilidad o no con la que se desmenuza un determinado material [11]) del carbón usado en los lechos determina la velocidad con que las partículas se rompen y se hacen más pequeñas, perdiéndose durante la operación de lavado del lecho o escapando del mismo durante el funcionamiento normal, como sucede con otros medios porosos.

Selección preliminar del carbón Activo Granular

La primera consideración en el diseño de un sistema de adsorción con carbón activo granular es la selección del carbón. La manera más precisa de realizarla es mediante pruebas dinámicas en columnas Piloto. Sin embargo, éstas requieren de mucho tiempo, y el pretender aplicarlas a toda la gama de carbones que puede haber disponibles en el mercado, sería muy costoso y poco práctico.

Como alternativa, puede empezarse por una preselección rápida de solo aquellos carbones de los que a priori pueden esperarse los mejores resultados. Después de

ésta, pueden hacerse los estudios detallados que permitan detectar el carbón activo granular idóneo de entre aquellos que se habían elegido.

La selección preliminar mencionada puede hacerse basándose en:

- La materia prima de la que parte el CAG.
- Las especificaciones y normas de calidad.
- Isotermas de adsorción.

En cuanto a la materia prima, ya que ésta determina el tamaño de los poros predominantes de un carbón activo, es posible predecir el tipo de moléculas que se retendrán de manera preferencial. Por lo tanto, de acuerdo a la materia prima, y conociendo la composición de los contaminantes presentes en el agua, se puede hacer una selección preliminar del tipo de carbones más adecuados.

La segunda propiedad del carbón activo granular en orden de importancia es la dureza, que también depende de la materia prima. Cuando la mayoría de los contaminantes son de bajo peso molecular, el carbón activo granular más adecuado, por su diámetro de poros, suele ser de concha de coco. Al ser éste el de mayor dureza no existe conflicto al respecto.

Por otro lado, si los contaminantes son de alto peso molecular, los carbones de madera o los ligníticos son los más apropiados. Aquí surge el problema de la falta de dureza de los mismos. En este caso puede requerirse que éstos se hayan sometido a un proceso de peletización que les brinde la dureza que no tienen de manera natural.

Respecto a las especificaciones, son propiedades del carbón activo granular (CAG) que reporta el fabricante, y que, entre otras cosas, sirven como apoyo en la preselección de carbones. Por otro lado, son un complemento que se toma

en cuenta, además de los resultados de otras pruebas, para elegir el carbón más conveniente desde el punto de vista de costo-beneficio. Por ejemplo, una de las especificaciones es el contenido de humedad; mientras mayor es ésta, menor es el porcentaje de carbón neto que suministra el fabricante y, por lo tanto, el precio neto es mayor.

Finalmente, las isothermas de adsorción son resultados de estudios con los que se determina la máxima capacidad que tiene un adsorbente en la retención de un soluto o de una mezcla de solutos. Los datos de isothermas de adsorción pueden encontrarse en la literatura, o bien pueden determinarse mediante pruebas relativamente sencillas.

3. PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVO

3.1. Materias primas

El carbón activo puede fabricarse a partir de un sinnúmero de materiales carbonosos, solamente se utilizan unos cuantos a nivel comercial, debido a su disponibilidad, bajo costo y a que los productos obtenidos, tiene las propiedades que cubren toda la gama de aplicaciones que el carbón activo pueda tener.

Prácticamente cualquier material orgánico con proporciones relativamente altas de carbono es susceptible de ser transformado en carbón activo. Los carbones activos obtenidos industrialmente pueden provenir de madera y residuos forestales u otros tipos de biomasa, turba, lignito y otros carbones minerales, así como de diferentes polímeros y fibras naturales o sintéticas. Existen, no obstante, algunas limitaciones. Así, desde un punto de vista estructural los carbones activos son carbones muy desordenados e isótropos (Isotropía es una característica física que se atribuye a un sistema material cuando presenta las mismas propiedades físicas en todas las direcciones [12]).

Por tanto, no serán adecuados para preparar carbones activos aquellos materiales carbonosos que pasen por un estado fluido o pseudo-fluido durante su carbonización, dado que durante la resolidificación de esta fase suelen formarse estructuras ordenadas en los carbones resultantes. No resultan adecuados, por tanto, los carbones coquizables, salvo que se eliminen sus propiedades coquizantes, mediante una oxidación previa. Del mismo modo, tampoco resultan adecuados los residuos termoplásticos.

Los factores que hay que tener en cuenta para elegir un precursor adecuado son:

- Buena disponibilidad y bajo coste.
- Bajo contenido en material mineral.
- Carbón resultante posea unas buenas propiedades mecánicas y capacidad de adsorción.

Los residuos de madera, las cáscaras de coco y frutos secos, así como las semillas de algunas frutas junto con los carbones minerales y el coque de petróleo, son los precursores más usados, pero existen otros:

- Carbón bituminoso.
- Huesos.
- Lignito.
- Hueso/Semilla de la aceituna.
- Azúcar.

En la tabla 3 se puede ver el producto que se obtiene por cada una de las materias primas utilizadas:

TABLA 3. TIPOS DE CARBÓN SEGÚN PROCEDENCIA.

<i>Propiedad</i>	<i>Coco</i>	<i>Carbón bituminoso</i>	<i>Lignita</i>	<i>Madera</i>
Microporos	Altos	Altos	Medianos	Bajos
Macroporos	Bajos	Medianos	Altos	Altos
Dureza	Alta	Alta	Baja	Mediana
Cenizas	5%	10%	20%	5%
Cenizas solubles en agua	Altas	Bajas	Altas	Medianas
Polvo	Bajo	Mediano	Alto	Mediano
Regeneración	Buena	Buena	Pobre	Regular
Densidad Aparente (g/cm³)	0.48	0.48	0.30	0.35
Número de Lodos (g/m²)	1100	1000	600	1000

Otra clasificación según su dureza (o resistencia a la abrasión) se muestra en la tabla 4:

TABLA 4. TIPOS DE CARBÓN ACTIVO Y SU DUREZA.

MATERIA PRIMA	ACTIVACIÓN	DUREZA
Madera de pino	Química	30 – 50
Madera de pino	Térmica	40 – 60
Carbón mineral bituminoso	Térmica	70 – 80
Concha de coco	Térmica	90 – 99

La elección del precursor es fundamentalmente una función de su disponibilidad, precio y pureza, pero el proceso de fabricación y la posible aplicación del producto final han de ser muy tenidos en cuenta.

3.2. Trituración

La trituración corresponde a la subdivisión hasta tamaños de escala relativamente gruesa, mientras que moler, por el contrario, se refiere a la subdivisión de los materiales en partes de gran finura. El desarrollo de la técnica de la subdivisión se ha realizado principalmente por vía empírica. Se dispone de una variedad de procedimientos y de dispositivos que permiten la elección correcta de las máquinas para desmenuzar. Las experiencias recogidas y el conocimiento exacto de todas las posibilidades de aplicación representan un papel decisivo en la mayoría de los casos.

Las máquinas más empleadas para el desmenuzamiento de las materias primas, con un paso previo de corte de los troncos, ya sea obtenido así, o bien por medio de cortadoras en la propia empresa, para que el tamaño inicial en el proceso de trituración sea más coherente con la trituradora que se utiliza y su tamaño, son las siguientes:

- Máquinas para desmenuzar en un orden de grueso relativamente grande (trituradores) por aplicación de presión
 - Trituradores de mandíbulas.
 - Trituradores de cono, trituradores giratorios.
 - Trituradores cilíndricos.
 - Trituradores de tambor.
- Trituradores con aplicación por choque
 - Trituradores de martillos.
 - Trituradores por impacto.

- Para desmenuzamiento en el rango de los finos (molinos) mediante impacto
 - Molinos de bolas.
 - Molinos de tubos.
 - Molinos Compound (Molinos por gravedad o de curso lento).
- Molinos por aplicación de presión
 - Molinos de bolas sobre pista en anillo (molino Peters).
 - Molinos por rodadura (o rodillos arrastrados).

De esta manera se evitarían tiempos de proceso más largos y aumento de problemas en la máquina: Ya sea por atascamientos de material en su interior o deterioro de la misma.

Según el curso seguido por el material, se distinguen:

- En el proceso de trituración
 - **Trituración de paso único.** El material pasa por el triturador una sola vez.
 - **Trituración en circuito cerrado.** El material que presenta dimensiones mayores se separa por cribado y retorna al triturador para desmenuzarlo hasta el tamaño exigido.

A veces el proceso de trituración se combina con secado preliminar.

- En el proceso de molienda
 - **Molienda en circuito abierto.** El material de molienda pasa una sola vez por el molino.
 - **Moliendo en circuito cerrado.** Se separa por medios mecánicos o neumáticos, el material que rebasa el tamaño exigido, no consigue salir del molino y retorna al inicio de la molienda hasta conseguir el tamaño deseado y así poder salir del molino. Vuelve tantas veces como necesite para la consecución del tamaño óptimo. La molienda de circuito cerrado se aplica también por vía húmeda.

3.2.1. Trituradores de mandíbulas

El uso del triturador de mandíbulas está ampliamente extendido en la industria del cemento por su construcción relativamente sencilla y porque se fabrica en unidades de gran tamaño. Normalmente, presta servicio como triturador preliminar.

El desmenuzamiento del material de la alimentación se desarrolla entre dos mandíbulas para la trituración de las que una es fija y la otra la mueve la presión ejercida por palancas acodadas. Las mandíbulas están revestidas con blindajes de perfil dentado en fundición o a la coquilla o acero templado. El marco de la máquina es de acero fundido. En las grandes unidades, el marco está compuesto de cuatro a seis placas de acero.

La superficie de las placas de blindaje está dentada longitudinalmente. Para la trituración de materiales frágiles, duros o de dureza mediana, el ángulo de los dientes es de 90° a 100°. Para materiales muy duros y en trozos gruesos, el dentado ha de ser ondulado y el ángulo de 100° a 110°. Para

materiales de gran tamaño y muy duros se utilizan blindajes cuyos dientes están separados.

En el desmenuzamiento preliminar de la caliza se utilizan con éxito los dientes de altura sobredimensionada. Cada tercer o cuarto diente está elevado respecto al resto de los dientes de altura normal. Con ello se logra que no se produzcan trozos planos o en forma de agujas en el material triturado.

El máximo desgaste se presenta en la parte inferior de las placas de las mandíbulas fijas, siguiéndole a continuación la parte inferior de la mandíbula móvil. Las placas de blindaje están construidas de manera que es posible, después de ese desgaste, girarlas 180° de modo que la parte desgastada quede en la parte superior de la placa, con lo cual se consigue prolongar su duración. Las placas de blindaje son de acero duro al manganeso.



FIG. 11. TRITURADOR DE MANDÍBULAS.

3.2.2. Trituradores de cono

Los trituradores de cono, también llamados trituradores giratorios, desmenuzan el material entre un anillo de trituración estacionario, cónico y otro cono triturador que realiza un movimiento circular alrededor de un eje vertical apoyado por la parte inferior del cono rotatorio y dispuesto excéntricamente al cono estacionario. En este caso, la trituración se realiza por presión y también parcialmente por flexión, igual que en el triturador de mandíbulas.

En la industria del cemento, los trituradores giratorios se utilizan también como desmenuzadores previos. Éstos pueden ofrecer de dos a tres veces los caudales correspondientes a los trituradores de mandíbulas de iguales dimensiones de boca y abertura de salida.

El triturador de cono no tiene movimiento vacío alguno y trabaja ininterrumpidamente durante el movimiento circular de su eje. Medido por el consumo de energía, el caudal del triturador giratorio por kW/h es mayor que el de mandíbulas y nunca aparecen trozos planos o alargados. Sin embargo, los blindajes sufren un desgaste más alto y por tanto, su sustitución se realiza a intervalos más cortos que en el caso de los de mandíbulas. Tampoco resulta posible en éstos el giro de 180°, que sí lo es en los otros trituradores.

El triturador giratorio no necesita dispositivo especial alguno para su alimentación. El material que se ha de triturar se puede arrojar directamente a la boca del triturador.



FIG. 12. TRITURADOR DE CONO.

3.2.3. Trituradores de cilindros

El desmenuzamiento se basa en que se consigue situar el material que se ha de tratar entre dos cilindros rotatorios y por la presión que ejercen lo trituran. El tamaño del grano final depende de la distancia entre ambos cilindros. Según el tipo de material que se ha de tratar, la superficie de los cilindros trituradores puede ser lisa, con nervaduras o estar provista de dentado. Según la dureza del material, las nervaduras están en la dirección del eje o transversalmente a éste (figura 13).

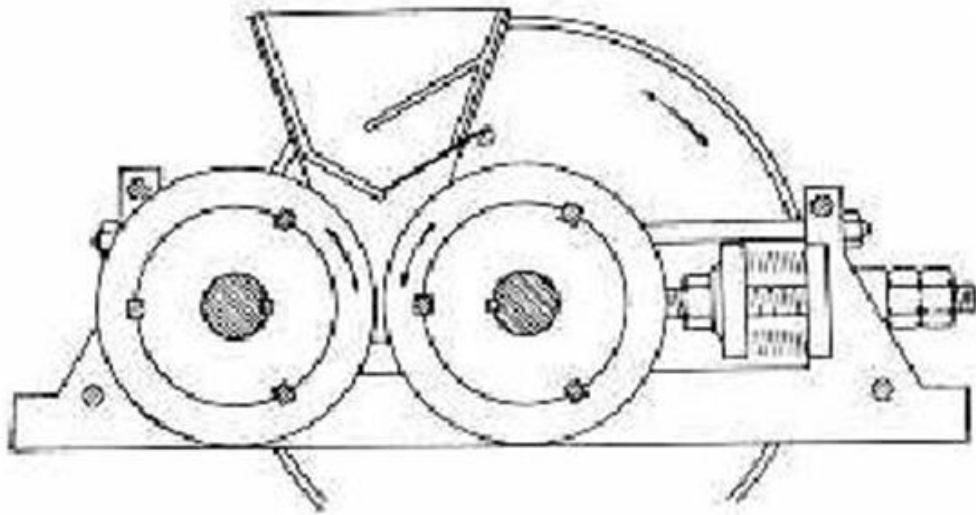


FIG. 13. TRITURADOR DE RODILLOS.

3.2.4. Triturador de tambor

El desmenuzamiento se basa en que consigue situar el material a tratar entre un cilindro, o tambor, y una superficie fija, ya puede ser una pared o un suelo, y por la presión que ejercen entre ambos trituran la madera. El tamaño del grano final depende de la distancia entre el tambor y la pared, cuanto menor distancia entre estos, menor será el tamaño de la partícula de madera (serrín).

Según el material a tratar la superficie del tambor puede ser lisa, con nervaduras o estar provista de dentado. En este caso el tambor utilizado tiene unos dientes para facilitar la trituración del tronco y crear las virutas de madera (figura 14).



FIG. 14. TRITURADOR DE TAMBOR PARA MADERA.

El material obtenido del triturador es enviado a silos para su posterior utilización.

En la figura 15 se muestra la entrada de la madera y su salida en forma de virutas en una sección del triturador.

Drum Chipper with chute

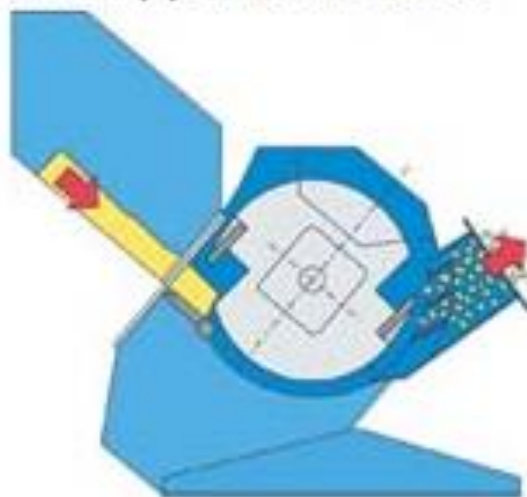


FIG. 15. SECCIÓN DEL TRITURADOR DE TAMBOR.

3.3. Impregnación

Es la fase de degradación química de la materia prima elegida, en la cual, se juntan en un mezclador el precursor, con el agente activante.

Esta etapa consiste en deshidratar el material precursor mediante la acción del activante, sea cual sea el método elegido.

El mezclador es de lecho horizontal, el precursor es bañado en el ácido en relación 1.5:1 (1.5 gramos de agente activante:1 gramo de precursor, como mínimo), con un tiempo de residencia calculado experimentalmente y observado en bibliografía, de 2h. En esta fase se obtiene la estructura porosa en el precursor, todo ello con atmósfera de gas inerte (N_2) [13].

En la figura 16, se muestra un mezclador cerrado y con posibilidad de trabajar con atmósfera inerte.



FIG. 16. MEZCLADOR.

El mezclador puede tener distintos materiales pero el proceso es el mismo en todos. Éste tiene unos distribuidores a modo de cilindros que van de un extremo a otro para distribuir el material por todo el tanque, removiendo, de manera que el serrín es mezclado completamente, además de facilitar la acción del ácido por el movimiento del material. En nuestro caso los cilindros llevan unas palas de manera que facilitan la entrada de más serrín y lo voltean de manera que sean recubiertos de ácido completamente. En la figura 17 se ve como las palas están para ayudar a este movimiento, llevando el serrín hacia el centro del tanque para su extracción.

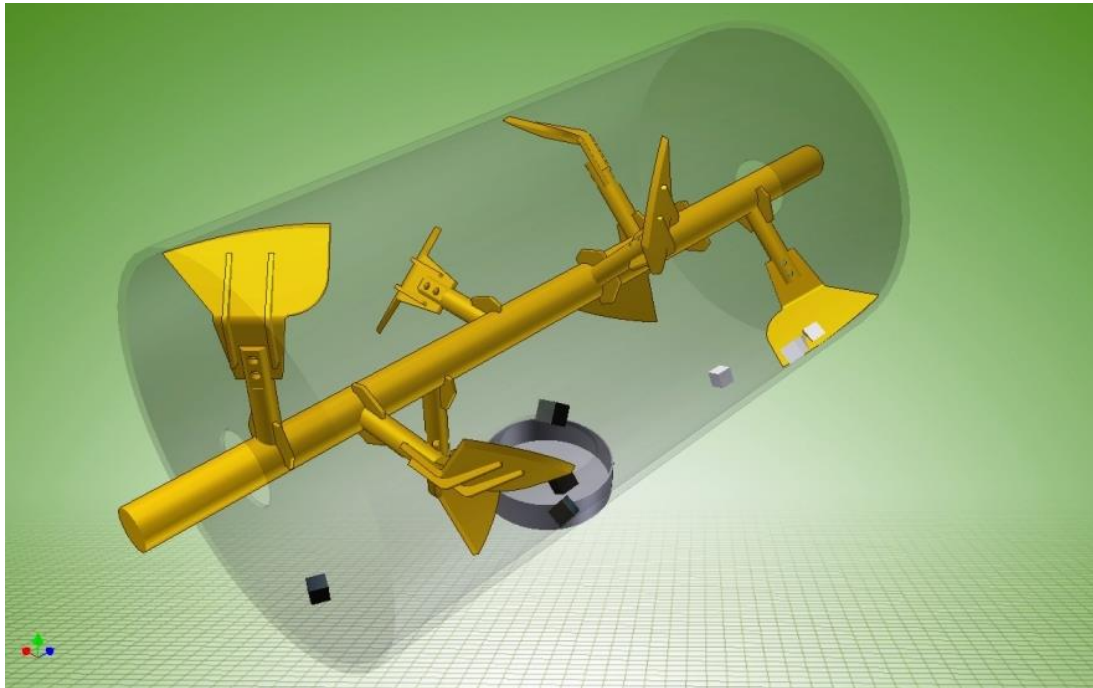


FIG. 17. INTERIOR DE UN MEZCLADOR.

3.4. Carbonización

La etapa de carbonización es una de las etapas más importantes de la obtención de los carbones activos, ya que en esta etapa se forma la estructura porosa inicial del precursor, la cual será desarrollada en el mismo sentido en la etapa posterior de activación.

A pesar de que los términos de pirólisis y carbonización se suelen utilizar indistintamente, debe hacerse notar que el primero se refiere a un proceso que lleve consigo una profunda descomposición térmica en atmosfera inerte a temperatura elevada (superior a 500 °C), en el que los productos gaseosos o volátiles de dicha composición son el objeto de estudio. Cuando se habla de carbonización se hace referencia a un proceso idéntico al anterior, pero el objeto de estudio en este caso se centra en el residuo sólido que queda después de la descomposición.

Durante la carbonización, la descomposición térmica de la materia prima carbonosa de partida conduce a dos fracciones:

- Una fracción volátil, rica en hidrogeno, que está formada por gases vapores y alquitranes (que son líquidos o solidos a temperatura ambiente),
- Y un residuo sólido, rico en carbono, denominado carbonizado.

Un esquema de las transformaciones químicas que tienen lugar se ilustra en la figura 18. La estructura de la materia prima inicial (carbón en este caso) se fracciona como consecuencia de la rotura de los enlaces menos estables (puentes metileno entre anillos aromáticos, éter, tioéter,

etc.), dando lugar a un gran número de radicales muy reactivos, parte de los cuales se estabilizan vía adición de hidrógeno, originando compuestos que son volátiles; otros radicales pueden sufrir reacciones de condensación y polimerización, dando lugar al residuo sólido carbonizado. Dicho residuo se encuentra enriquecido en carbono y en anillos aromáticos en comparación con la materia prima inicial. Por otro lado, los productos gaseosos formados pueden sufrir reacciones secundarias en fase gas debido a la acción de la temperatura, las cuales no afectan prácticamente a la estructura del carbonizado obtenido [14].

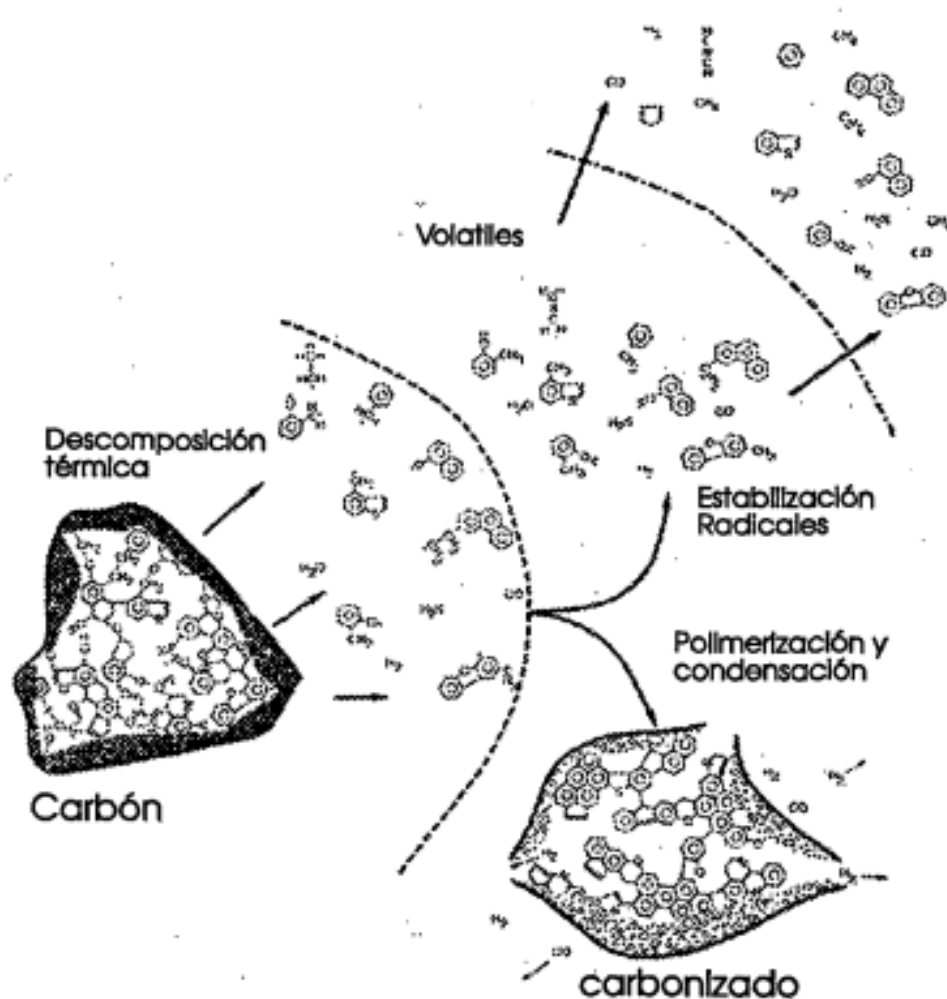


FIG. 18. ESQUEMA DE LAS REACCIONES EXISTENTES EN LA CARBONIZACIÓN.

El carbonizado presenta unas formaciones cristalográficas relativamente organizadas denominadas cristales grafiticos elementales. Estos cristales se agrupan de forma irregular, de modo que siempre quedan huecos muy estrechos entre ellos, que además pueden estar bloqueados por la deposición del residuo generado por el craqueo de alquitranes en su salida de la partícula. Por tanto, el carbonizado obtenido tiene una pequeña capacidad de adsorción que necesita ser incrementada en una etapa posterior.

Las características del carbonizado obtenido no sólo serán distintas en función de la materia prima utilizada, sino que puede tener características (y comportamientos muy diversos en la posterior etapa de activación) en función de, fundamentalmente:

- i. La temperatura final del proceso.
- ii. El tiempo total del proceso.
- iii. La velocidad de calefacción.
- iv. La atmosfera en la cual se haya producido la pirólisis.

Parece ser que el efecto más importante es la temperatura final del proceso, ya que está asociada a la necesidad, por parte de las macromoléculas, de cantidades de energía suficientes para producir la ruptura de un mayor número de enlaces químicos, y por tanto permitir una mayor salida de productos volátiles. Esto produce en el carbonizado una mayor compactación.

Otro parámetro importante en el proceso de carbonización es la velocidad a la cual se alcanza la temperatura final del proceso. Cuando la temperatura aumenta rápidamente, se solapan tanto la descomposición térmica del sólido como las reacciones secundarias del proceso, y por tanto es más difícil controlar la formación de

la porosidad en el carbonizado. Cuando la velocidad de calefacción es elevada, es más difícil que se produzca una reorganización en la estructura química del carbonizado, y además los poros formados son más grandes que los que se forman con velocidades de calefacción más lentas. La reactividad de los carbonizados en la etapa posterior de activación es mayor cuanto mayor haya sido la velocidad de calefacción. Por el contrario, la resistencia mecánica de las partículas de carbonizado es mayor cuanto menor sea su velocidad de calefacción.

Respecto a la atmosfera en la cual se produzca la pirólisis, si los gases producto de la pirólisis son eliminados rápidamente del carbonizado mediante una corriente de gas inerte, la cantidad de carbonizado obtenida será menor, pero será más reactivo, al evitarse el craqueo de alquitranes en la superficie de la partícula, con lo cual se evita que el residuo sólido formado en una reacción de craqueo se deposite sobre la partícula de carbonizado.

Normalmente, el proceso de carbonización de las partículas suele llevarse a cabo en tres tipos de reactores:

- Reactores discontinuos de lecho fijo con calefacción externa.
- Reactores continuos de horno rotatorio, con calefacción interna y externa.
- Reactores continuos de lecho fluidizado.

En los reactores de lecho fijo, existe un gradiente de temperaturas importante entre la zona próxima a la pared del reactor y la parte central, con lo que la calidad del carbonizado obtenido no es muy homogénea. Los hornos rotatorios con calefacción interna tienen la ventaja de ser de fácil construcción, pero al ser normalmente gases de combustión los utilizados como calefacción interna, éstos suelen llevar algo de aire, con lo que se producirá una oxidación parcial del carbonizado, que lleva asociado una pérdida de resistencia mecánica. Sin embargo, este tipo de reactor es muy adecuado para llevar a cabo una carbonización completa y uniforme del material.

En la tabla 5 se puede ver algunos de los distintos ejemplos de tratamientos previos necesarios antes del proceso de carbonización en función de la materia prima que se utiliza.

TABLA 5. TRATAMIENTOS PREVIOS A LAS MATERIAS PRIMAS

<u>MATERIA PRIMA</u>	<u>TRATAMIENTO PREVIO</u>	<u>OBJETO</u>
<u>Madera</u>	Precarbonización 500 °C	Unión Aglomerante- Madera
<u>Acrilonitrilo</u>	Preoxidación 500 °C	Iniciar Porosidad
<u>PVC</u>	Preoxidación 360 °C	Eliminar HCl
<u>Hueso Aceituna</u>	Lavado H ₂ SO ₄ y H ₂ O	Eliminar Aceite

3.5. Activación

Los procesos de fabricación del carbón activo, se pueden dividir en dos tipos según la activación sea térmica (también llamada física) o química. La porosidad de los carbones preparados mediante activación térmica es el resultado de la gasificación del material carbonizado a temperaturas elevadas, mientras que la porosidad que se obtiene en activación química es generada por reacciones de deshidratación química, que tiene lugar a temperatura mucho más bajas [15].

El proceso de activación consiste básicamente en reordenar los átomos de carbono en anillos tipo benceno para lograr una estructura cristalina reticular similar a la del grafito, en otras palabras, la activación consiste en “multiplicar” la cantidad de poros de un carbón dando como resultado una estructura extremadamente porosa de gran área superficial disponible para llevar a cabo el proceso de adsorción de impurezas que provocan olor, color o sabor indeseable, entre otras.

3.5.1. Activación térmica

Llamada también física, a pesar de que la activación se produce por la reacción del agente activante con el carbono del material que está siendo activado.

El producto obtenido en el proceso de carbonización tiene una estructura porosa desarrollada débil, pero si no es sometido a la etapa de activación posterior no puede ser utilizado como adsorbente. El método de activación térmica o física consiste en tratar la materia prima en presencia de gases oxidantes (dióxido de carbono, vapor de agua, oxígeno)

a elevadas temperaturas. En este proceso, el carbono de la estructura carbonosa reacciona con el agente oxidante, formando óxidos de carbono. Debido a una gasificación parcial del sólido inicial, se desarrolla una gran estructura porosa en el interior de las partículas.

La velocidad del proceso de activación está limitada por el tipo de materia carbonosa inicial y el agente activante. Entre los agentes activantes, el más reactivo es el oxígeno, mientras que el menos reactivo es el dióxido de carbono.

Si el precursor es un carbón coquizable será necesario entonces una etapa de oxidación para eliminar las propiedades coquizables. En otras ocasiones el material de partida es molido hasta formar un fino polvo, después compactado con algún aglomerante en forma de briquetas y luego vuelto a moler hasta obtener el tamaño deseado. De esta forma se consigue una mejor difusión del agente activante y por tanto una mejor porosidad en el carbón activo resultante. Otra etapa previa a la activación propiamente dicha es la carbonización, en la cual el precursor es sometido a elevadas temperaturas (del orden de los 800 °C) en ausencia de aire, para eliminar las sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso que será el que se someta a la activación. Una vez carbonizado, la salida de los gases y vapores del precursor produce una porosidad “incipiente” en él, la cual se desarrolla aún más durante la etapa de activación. La activación propiamente dicha puede ser un proceso totalmente independiente de la carbonización o llevarse a continuación de ésta.

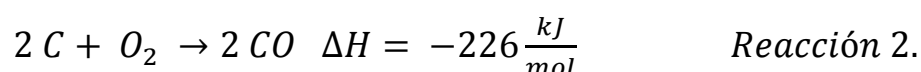
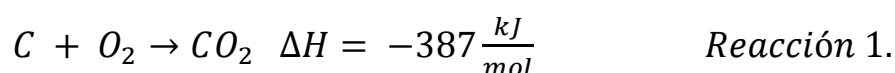
Como se mencionó anteriormente, normalmente la materia prima se somete a una etapa previa de carbonización, aunque no es necesario. Si es sometido a dicha etapa de carbonización, el proceso de activación se denomina *activación en dos etapas*, mientras que si la etapa

de carbonización no se produce se denomina *activación directa*.

Agentes activantes para la activación térmica

Activación con oxígeno

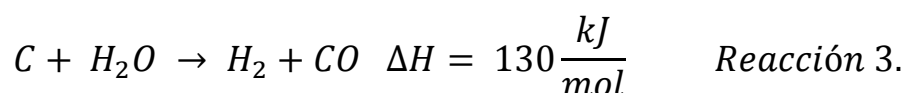
La reacción de carbono con oxígeno produce simultáneamente dióxido y monóxido de carbono de acuerdo con las siguientes ecuaciones estequiométricas:



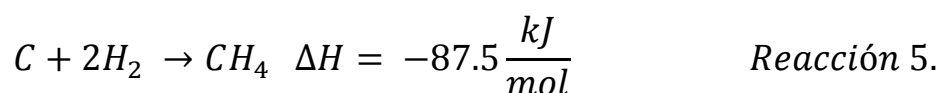
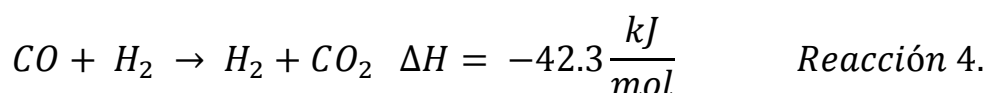
Siendo ambas reacciones exotérmicas. Los mecanismos de reacción, sin embargo, todavía no están totalmente esclarecidos. Parece ser que tanto el dióxido como el monóxido de carbono son productos primarios de la reacción, y la proporción CO/CO₂ aumenta con un incremento de temperaturas. Este agente activante es raramente utilizado ya que lleva consigo muchas dificultades. Al ser exotérmica la reacción, es muy difícil controlar la temperatura del proceso, y al aumentar localmente la temperatura, la reacción estaría controlada por difusión y no se desarrollaría la estructura interna, sino que se quemaría su superficie.

Activación con vapor de agua

La reacción básica del carbono con el vapor de agua es endotérmica:



Esta reacción ha sido estudiada extensamente, no sólo desde el punto de vista del proceso de activación, sino porque también es la reacción principal de obtención del gas de agua. Además, los productos de esta reacción pueden reaccionar posteriormente tanto en fase homogénea como en fase heterogénea de acuerdo con las siguientes reacciones:



Cinéticamente, para mayoría de los precursores carbonosos la velocidad de reacción respecto al grado de conversión viene dada por la ecuación 6:

$$\frac{dX}{dt} = K (1 - X)^n \quad \text{Ecuación 6.}$$

Donde n es el orden de la reacción con respecto al grado de conversión X (masa de carbonizado reaccionado/masa de carbonizado inicial libre de cenizas), y K es la constante aparente de velocidad que depende de la temperatura y las presiones parciales de las especies presentes, es decir, del mecanismo de la reacción. Aunque existen otros modelos de interpretación, n normalmente tiene los siguientes valores:

- $n = 0$. Reacción de orden cero. Es muy infrecuente que ocurra en casos de gasificación no catalizada.
- $n = 1$. La reacción es de primer orden respecto al grado de avance. Este modelo cinético se denomina modelo de conversión uniforme, y la reacción heterogénea

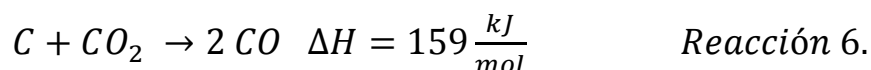
tiene lugar indistintamente en cualquier parte de la partícula. En estas condiciones, la reacción está controlada por la reacción química, sin existir problemas de difusión. El carbonizado que reaccione según este modelo es apropiado para la obtención de carbones activados, al producirse la reacción en el interior de la partícula.

- $n = 0.67$. Este orden de reacción corresponde al modelo de núcleo sin reaccionar. La reacción heterogénea se produce únicamente en la superficie de la partícula, disminuyendo la misma de tamaño a medida que la reacción avanza en el tiempo. En este caso, la velocidad de reacción química es tan rápida que entra en competencia con la difusión interna de la partícula, de tal forma que la reacción se produce principalmente en la superficie de la misma. Para este modelo, la constante global de velocidad dependerá también del tamaño de la partícula y parámetros relativos a la difusión interna. El carbonizado que reaccione según este modelo no será válido como carbón activo al no gasificarse el interior de la partícula.

En función del tipo de carbonizado utilizado y de las condiciones experimentales (presión y temperatura), la cinética de la gasificación de carbones se ajusta a distintos modelos, siendo el modelo de núcleo sin reaccionar y el modelo de conversión uniforme los más habituales.

Activación con dióxido de carbono

La reacción 6, entre el carbono y el monóxido de carbono, que es heterogénea y endotérmica, viene representada por:



Las reacciones del carbón tanto con dióxido de carbono como con vapor de agua necesitan absorción de calor para producirse, razón por la cual las partículas de carbón deben estar en contacto óptimo con el agente activante, es decir, debe estar el gas a una temperatura ligeramente superior a la temperatura de reacción, siendo necesario aportar calor al sistema para mantener la temperatura de reacción. En estas condiciones, la reacción puede controlarse fácilmente si se opera en condiciones en las que predomine el factor cinético. Sin embargo, el uso de oxígeno como agente activante presenta como principal dificultad la alta exotermicidad de la reacción, con lo cual es muy difícil controlar la temperatura local de las partículas. En estas condiciones la velocidad de reacción puede ser tan alta que el proceso pase a estar controlado por el factor difusión, con lo cual en vez de producirse la gasificación del carbón homogéneamente en el interior de la estructura, se producirá únicamente en la superficie con lo cual no se activaría el material carbonoso.

Por estos motivos, la activación con oxígeno apenas se utiliza. A veces es empleada para activar a baja temperatura materiales muy poco reactivos, pero siempre mezclado con vapor de agua.

Desarrollo poroso en la activación térmica

El desarrollo de la porosidad producido en un determinado carbonizado es distinto en función del agente activante utilizado.

Inicialmente, en el proceso de activación térmica se produce el quemado de pequeños fragmentos desorganizados de carbón en las entradas de los poros de la partícula que bloquean la accesibilidad al interior de la partícula, con lo que se produce un incremento en la porosidad más estrecha de la partícula (microporosidad), sin diferencias apreciables en función del agente oxidante utilizado.

Sin embargo, a medida que se va aumentando el grado de activación, las diferencias entre la porosidad creada por distintos agentes se va haciendo cada vez más pronunciada: Mientras que el dióxido de carbono desarrolla más intensamente la porosidad estrecha de la estructura, el vapor de agua produce mayoritariamente un agrandamiento y ensanchamiento de la estructura porosa inicial. Por supuesto, es fundamental para el desarrollo de la porosidad la estructura del carbonizado inicial de partida.

En la figura 19, se muestra el esquema básico para la obtención de carbones activos por el proceso de activación térmica. La materia prima es acondicionada previamente, bien por molienda, tamizado y selección del tamaño de partícula adecuado (si es para la obtención de carbones activos granulares), o bien pulverizando, aglomerando y briquetizando (para la obtención de carbones activos en polvo o en briquetas). Además, el tratamiento previo de la materia prima puede incluir una etapa de desmineralización y lavado con objeto de reducir el contenido en impurezas

inorgánicas en el precursor. Una vez concluidos los tratamientos previos, comienza el proceso “químico” en sí.

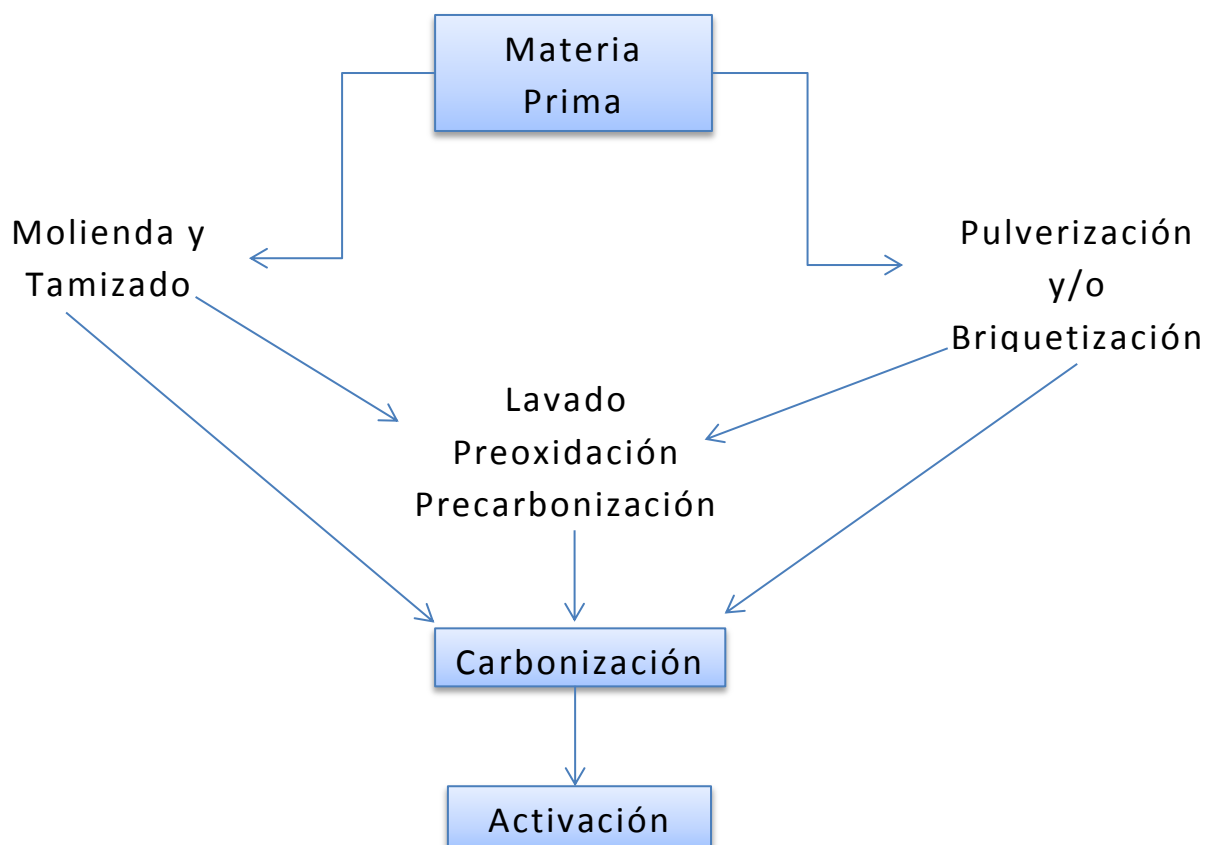


FIG. 19. PROCESO DE OBTENCIÓN DE CARBONES ACTIVOS POR MEDIO DE ACTIVACIÓN TÉRMICA.

3.5.2. Activación química

La segunda forma de obtención de carbones activos incluye la reacción del precursor del carbón con un reactivo, y se conoce como activación química. La porosidad se desarrolla a la vez que el material se descompone térmicamente hasta una temperatura de 350 – 900 °C. Aunque el proceso puede llevarse a cabo en varias etapas, lo normal es que sólo se utilice un único reactor, es decir, se realiza en una única etapa. Por otro lado, la viabilidad del proceso de activación química depende enormemente de la eficacia de la recuperación del reactivo para su reciclado y reutilización posterior. Por eso, es necesaria una etapa posterior de lavado del carbón activo para eliminar restos del agente activante.

Los reactivos que han sido más utilizados a escala industrial son el cloruro de zinc y el ácido fosfórico, mientras que los precursores carbonosos han sido mayoritariamente materiales lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa, lignina) como a madera, algodón, frutas, etc. El proceso con cloruro de zinc (ZnCl_2) fue el principal método utilizado de activación química hasta 1970, aunque en la actualidad todavía es utilizado en China. Bajas eficacias en la recuperación del reactivo, problemas de corrosión, presencia de zinc en el carbón activo resultante han sido razones por las cuales este método fue desplazado en la industria por el método del ácido fosfórico (H_3PO_4) [16].

También ha sido desarrollado otro método de activación química con hidróxido de potasio (KOH), aunque su uso es menos frecuente.

En la figura 20, se muestra un esquema general de los pasos para el proceso de activación química de carbón activo.



FIG. 20. PROCESO DE OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVO POR MEDIO DE ACTIVACIÓN QUÍMICA.

Agentes activantes para la activación química

Activación química con ZnCl_2

Un único reactor, y por tanto proceso, es necesario para llevar a cabo el proceso de activación química con cloruro de zinc. La materia prima, principalmente madera, es impregnada con ZnCl_2 , del orden de 0.4 a 2.5 g. por cada gramo de precursor, siendo sometido a un tratamiento térmico en atmosfera inerte a una temperatura de 500 – 800

°C. Como se mencionó anteriormente, este proceso apenas es utilizado en la actualidad por lo que no se analiza con mayor extensión. Utilizado especialmente para la activación de residuo de madera.

Activación química con H_3PO_4

La producción de carbones activos con altas superficies aparentes en el método de activación química con ácido fosfórico depende, principalmente, de la estructura del material original, de la relación ácido-precursor y de la velocidad de calefacción de la temperatura final. La madera es la materia prima más utilizada. Las principales características de los carbones activos derivados de madera por activación con ácido fosfórico comparado con los obtenidos por activación térmica son su menor densidad, menor resistencia mecánica y desarrollo de la porosidad media (mesoporosidad).

En la figura 21, se muestra un esquema de una planta productora de carbones activos por el método de ácido fosfórico a partir de serrín. La madera, previamente convertida en serrín es mezclada con H_3PO_4 (proporción 1,4 g. H_3PO_4 /gramos precursor, como mínimo) y entra a un horno rotatorio, con atmosfera inerte, en el cual existe un gradiente de temperaturas de 100 – 200 °C a 400 – 500 °C de temperatura final, y manteniéndola esta temperatura en torno a una hora. El carbón activo obtenido es lavado (para recuperar el ácido para su reutilización), seguido de una etapa de secado y posterior etapa de separación en distintas granulometrías. El H_3PO_4 sobrante, se separa y recircula.

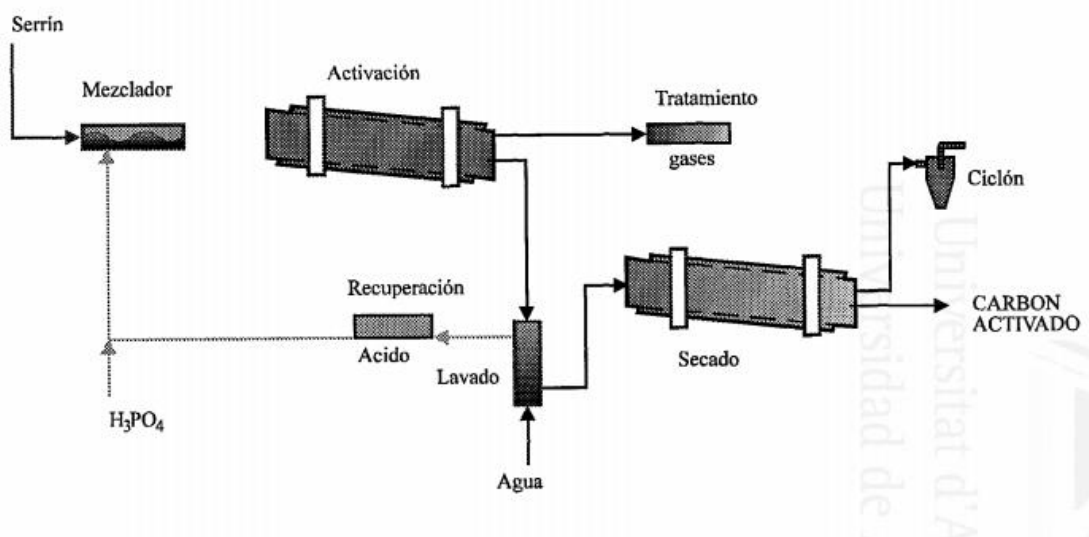


FIG. 21. ESQUEMA DE UN PROCESO DE ACTIVACIÓN QUÍMICA CON H_3PO_4 .

El rendimiento de esta operación en carbón activo obtenido es del 50% aproximadamente respecto a la masa de precursor utilizado.

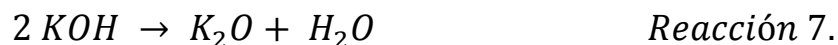
Activación química con KOH

En la década de los 70, el centro de investigación de AMOCO Corporation desarrolló un proceso con KOH que producía carbones activos con elevadas áreas superficiales aparentes. Este método apenas es utilizado en la industria ya que actualmente no es rentable económicamente, aunque en un futuro podría utilizarse para la obtención de carbones activos muy específicos.

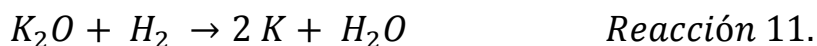
En el método del KOH, los precursores más utilizados son el coque de petróleo y los carbones minerales. Inicialmente se mezclan tanto el precursor como el hidróxido en polvo en una proporción 4 gramos KOH/gramo precursor. Cuando la impregnación tiene lugar en medio acuoso, se somete a dos tratamientos térmicos distintos en atmosfera

inerte: El primero de los tratamientos a temperaturas “bajas”, dos horas a 400 °C y posteriormente otras dos horas a 900 °C. En el caso de mezcla física no es necesario llevar a cabo el primer tratamiento.

En el primer calentamiento las reacciones (7 – 10) que tienen lugar son:



Mientras que en el segundo calentamiento, por encima de 700 °C las siguientes reacciones (11-12) se suman a las anteriores, en las que se forma K metálico:



Los carbones activos obtenidos con KOH tienen elevadas capacidades de adsorción comparados con los obtenidos con otros métodos.

3.5.3. Hornos rotatorios

Parte principal del proceso, donde se produce la activación del carbón. Estos hornos constan de un tubo cilíndrico dispuesto algo inclinado (de un 3 a un 5% sobre la horizontal), que en su interior lleva un forro de material refractario. Los hornos de pequeño diámetro tienen una inclinación mayor que los de diámetro grande. El material se introduce en el horno por su extremo superior y la calefacción (la llama) se aplica por el otro extremo, el inferior, es decir, que tales hornos trabajan a contracorriente. El combustible inyectado puede ser carbón pulverizado, petróleo o gas. También cabe la posibilidad de que se trabaje la calefacción por vapor sobrecalentado previamente optimizado en una red de calderas, que funcionan con fuel-oil.

El tubo descansa sobre dos o varios pares de rodillos, según su longitud. Éstos están dispuestos bajo el horno de tal forma que las líneas que pasan por el eje del horno y los ejes de los rodillos forman con la vertical un ángulo de 30°. Su posición exacta se determina y regula según la de los aros de rodamiento cuando el horno está a la temperatura de trabajo, es decir, teniendo en cuenta el alargamiento del tubo.

Existen los siguientes tipos principales de cilindros para horno rotatorio:

- Horno rotatorio con diámetro unitario.
- Horno rotatorio con zona de sinterización ensanchada.
- Horno rotatorio con zona de calcinación ensanchada.
- Horno rotatorio con zona de sinterización y calcinación ensanchadas.

- Horno rotatorio con zonas de desecación o precalentamiento ensanchadas (horno largo vía seca o vía húmeda).

La ampliación del diámetro en algunas zonas del tubo del horno tiene por objeto prolongar el tiempo de permanencia, con el correspondiente descenso de la velocidad de los gases y así mejorar la transmisión del calor al material. Sin embargo, por esas zonas se producen diferentes tiempos de paso del material a lo largo del horno, que generan desplazamientos irregulares en él, influyendo desfavorablemente en la explotación del horno. En la transición de las secciones ampliadas a las que no lo han sido se producen retenciones del material que ocasionan rozamientos y producen polvo. La realización de las piezas de transición es más cara que las de virolas cilíndricas. El vestido del material refractario de las zonas de transición es complicado, costoso en trabajo humano y exige configuraciones especiales para los ladrillos. Una forma especialmente desfavorable, bastante usual, presenta estrechada la salida del horno. Tal solución conduce a un enfriamiento parcial del Clinker en el horno y a la rápida inutilización del revestimiento refractario en esta sección.

Pendiente del horno

No hay ninguna regla válida para determinar la pendiente de los hornos rotatorios. Su valor oscila entre el 2-6 %. Aunque la mayoría de los hornos están instalados con pendientes entre el 2-4 % con relación a la horizontal. Cuanto menor sea la pendiente se requerirá velocidades más altas de esta manera, crece el movimiento de las partículas de carbón favoreciendo el intercambio de calor. También, si la inclinación es pequeña se alcanza un grado de llenado más alto. Los grados de llenado fluctúan entre los límites 5-17 %.

En la explotación práctica del horno, el grado de llenado no debe pasar del 13 %, pues valores superiores empeoran la transmisión de calor.

Mientras que los diámetros de los hornos eran de 0-3 m, se hablaba de modo general del número de vueltas del horno. Sin embargo, actualmente por haber hornos de 6 o más metros de diámetro, la velocidad del movimiento rotatorio del horno se hace expresa por la velocidad tangencial o periférica en lugar de hacerlo por el número de vueltas. Para la explotación económica del horno se utilizan las velocidades periféricas de 38-40 cm/s.

Se puede regular a voluntad el tiempo de permanencia del material en el horno, eligiendo la pendiente adecuada así como la variación del número de vueltas en la unidad de tiempo.

Transporte del material en el horno

En general, en el horno rotatorio se desarrollan dos procesos:

- Proceso termoquímico.
- Transporte de material.

El proceso termoquímico condiciona que el material no avance con velocidad regular en el horno. Con velocidad angular constante, el material se desplaza a diferente velocidad en las distintas zonas.

Las diferencias de velocidad de paso son consecuencia de las variaciones físicas y químicas que se dan a lo largo del proceso de carbonización en el horno.

El producto llega al horno por gravedad y por tuberías cerradas, ya que el paso del mezclador al horno tiene que ser por atmósfera inerte. El horno rotatorio trabaja con

gradientes de temperatura, por eso se puede dividir el horno, como si se tratasen de 4 hornos distintos. La primera fase del horno es un secado y de manera continuada una etapa de precarbonización donde el material es expuesto a un gradiente de temperatura de 100 °C a 200 °C (el gradiente es de 3,3 °C/min.) estando en esta fase durante treinta minutos.

La siguiente fase es la carbonización, en la cual, esta parte del horno inicia a una temperatura de 200 °C con un gradiente de temperatura que va hasta los 400 °C (el gradiente es de 2 °C/min.) estando en esta sección del horno entorno a cien minutos (1 hora y 40 minutos). En esta zona empieza la formación de carbón y el inicio de la porosidad.

La penúltima parte y más importante donde se producen el número de poros y tamaño seleccionado es la activación y hace un último gradiente de 400 °C a 500 °C. el tiempo es determinado según el producto deseado, en este caso el proceso es lento para conseguir las características necesarias necesitando un tiempo de ciento cincuenta minutos (2 horas y 30 minutos). Por lo tanto el gradiente será de 0,667 °C/min.

La última fase del horno es en la que se lleva a cabo el enfriamiento del material. El tiempo desde su inicio hasta la salida del horno será de unos veinte minutos y se realiza con agua a temperatura ambiente.

A la salida del horno se encuentra el producto “final”, carbón activo, pero todavía no está listo, necesita del tratamiento de lavado para poder considerarse producto final. Aquí todavía sale impregnado del ácido, el cual debemos eliminar.

También, gran parte del ácido ha sido evaporado en el proceso de activación, a través de formación de compuestos

inorgánicos de ahí que tengamos que poner un tratamiento de gases a la salida del horno, como puede ser un condensador de gases, para licuar y recuperar los compuestos de fosforo, o también, la posibilidad de una chimenea para quemar los gases que no pueden ser emitidos a la atmosfera en cualquier condición.

Zonas del horno rotatorio

En un horno rotatorio normal, no conectado con intercambiador térmico de ningún tipo, se pueden distinguir diferentes zonas para el proceso de carbonización de la madera impregnada en ácido fosfórico, cuyas longitudes están expresadas en porcentajes de la longitud total del horno en la tabla 6.

TABLA 6. LONGITUDES DE CADA ZONA DE UN HORNO ROTATORIO PARA CARBÓN ACTIVO.

% Longitud del horno	Zona	Temperatura (°C)
14	Secado/Precarbonización	100-200
25	Carbonización	200-400
33	Activación	400-500
8	Enfriamiento	500-150

Revestimiento interno del horno

El tiempo de actividad del horno (también llamado marcha) depende, en primer lugar, de la calidad del revestimiento del horno. Se prescinde de su alto precio y se adquieren las mejores calidades del material para revestir el horno a fin de lograr un dilatado período de explotación.

Las finalidades del revestimiento de refractario del horno rotatorio son:

- Proteger a la envolvente de chapa del horno de las altas temperaturas de las llamas y del material en proceso de reacción.
- Rebajar las pérdidas de calor por radiación y convección de la chapa del horno.

Aparte de esto, el revestimiento del horno absorbe energía térmica de los gases calientes del horno y la cede al material. Puesto que los gases están a una temperatura significativamente más alta que el material, durante la rotación del horno, el revestimiento está sometido a variaciones de temperatura. Como consecuencia del movimiento rotatorio del horno, el forro también está sometido a sollicitaciones mecánicas. Hay que considerar además la acción del desgaste por rozamiento ocasionada por el material al chocar y rodar sobre el revestimiento.

Calefacción por combustión

La calefacción por combustión en el horno rotatorio es producida por:

- Quemadores de polvo de carbón.
- Mecheros para fuel – oil.
- Quemadores de gas natural.
- Red de calderas con suministro de agua/vapor sobrecalentado.

El mechero del horno rotatorio puede estar dispuesto paralelamente al eje del horno o también paralelamente al plano de la plataforma de servicio del hornero.

En esta última disposición, el mechero está inclinado respecto al eje del horno hacia el material, lo que no siempre ofrece los mejores resultados para la combustión puesto que las llamas chocan con el material.

En cuanto a la posición del mechero, éste está situado en el centro de la sección del horno. Sin embargo, también hay modificaciones en ese aspecto. Siguiendo este punto de vista, particularmente en los hornos de gran diámetro, el mechero queda más próximo al material pero dispuesto paralelamente al eje del horno, con lo que se evita la inclinación del mechero hacia el material.

Con respecto a la llama, ésta varía considerablemente de longitud, forma, color, dirección y punto de ignición a lo largo del horno. Se debe conseguir el fuego más corto posible y la temperatura de llama más alta, sin influenciar de manera negativa en la calidad del producto. Además, debe evitarse el sobrecalentamiento de la capucha del quemador, de la zona de descarga del horno o del enfriador.

Una vez conseguida la calidad de llama deseada, es preciso operar con el horno de forma que exista la mínima perturbación posible de la misma.

La cantidad de calor liberado por la llama depende de su temperatura y por tanto de su color. Las diferentes tonalidades se recogen en la tabla 7.

TABLA 7. COLOR DE LA LLAMA EN UN HORNO ROTATORIO SEGÚN LA TEMPERATURA.

<i>COLOR</i>	<i>TEMPERATURA (°C)</i>
Rojo visible más tenue	475
Rojo visible más tenue a color cereza	475-650
Rojo oscuro a rojo cereza	650-750
Rojo cereza a rojo cereza brillante	750-825
Rojo cereza brillante a naranja	825-900
Naranja a amarillo	900-1090
Amarillo a amarillo brillante	1090-1320
Amarillo brillante a blanco	1320-1540
Blanco a blanco deslumbrante	1540-

En la figura 22, se puede observar un horno rotatorio:



FIG. 22. HORNO ROTATORIO.

3.6. Lavado del material

La separación de una mezcla de compuestos sólidos también se puede llevar a cabo aprovechando diferencias de solubilidad de los mismos en un determinado disolvente. En el caso favorable de una mezcla de sólidos en la cual uno de los compuestos es soluble en un determinado disolvente (normalmente un disolvente orgánico), mientras que los otros son insolubles, podemos hacer una extracción consistente en añadir este disolvente a la mezcla precursor-agente activante, en frío o en caliente y separar por filtración la disolución que contiene el producto extraído y la fracción insoluble que contiene las impurezas. Si, al contrario, lo que se pretende es disolver las impurezas de la mezcla sólida, dejando el producto como fracción insoluble, el proceso, en lugar de extracción, se denomina *lavado* [17].

Cuando se obtiene el carbón activo del horno, y una vez enfriado por este, se procede a realizar la separación entre el carbón activo y el ácido fosfórico. Este paso puede ser realizado de varias maneras:

Torres de extracción/lavado. Donde el carbón activo, que es un sólido, se pone en contacto con un fluido, el cual, extrae el agente activante, que es soluble en dicho fluido, dejando el producto final lavado y pudiendo ser secado para la obtención del producto acabado. El tiempo en contacto entre el sólido y el fluido lavador está calculado experimentalmente de manera que por medio de las medidas pertinentes se sabe las dimensiones de la torre, así como la cantidad de fluido lavador necesario para eliminar el agente activante del producto. Con un control de pH a la salida de la torre, se puede asegurar la purificación completa del producto. La figura 23 muestra una torre de lavado industrial.

Existen varias torres de extracción/lavado. Las torres de contacto se utilizan para operaciones que requieren un íntimo contacto entre dos fluidos (líquido-líquido o líquido-vapor) o entre un fluido y un sólido. Las operaciones típicas son:

Destilación: Proceso en que los componentes de una mezcla se separan por la diferencia de volatilidad.

Absorción: Un componente de una corriente gaseosa se disuelve en un líquido absorbente.

Adsorción: Un componente de un sólido que es separado o disuelto por una fase fluida (líquida o gaseosa) adsorbente.

Extracción/Lavado: Un componente disuelto en un líquido o pegado a un sólido, se concentra en otro por diferencia de solubilidad.

Los tipos de torres de contacto los podemos clasificar en:

- Columnas de platos
 - Plato tapa circular o capucha.
 - Plato de válvula.
 - Plato de orificios o malla.
- Columnas de relleno
 - Relleno aleatorio. Rellenos tipo anillos, sillas,...
 - Relleno estructurado. Rellenos tipo rejilla, o anillos estructurados.

3.6.1. Columnas de platos

Los tipos más comunes son las de plato de tapa circular o capucha, las de plato de válvula y las de plato de orificios o malla. Las más estudiadas son las de tapa circular disponiéndose para ellas de un número mayor de tablas y ecuaciones empíricas. Generalmente las columnas de platos son de flujo cruzado.

3.6.2. Torres de relleno

El tipo común de una torre de relleno consiste en una carcasa cilíndrica que contiene un material de relleno inerte. En ellos la disolución circula a contracorriente con una amplia área de contacto entre ella y el sólido extractor.

Estas torres de relleno cambian cuando su función en vez de extracción es de lavado, siendo el fluido el que se mantiene inmóvil en la torre, añadiendo el sólido por la parte superior y por gravedad, pasa a través del fluido, haciendo este su función lavadora, y recogiendo el sólido en la parte inferior. Es un proceso discontinuo para poder separar fluido y solido por distintas vías y sin fugas.



FIG. 23. TORRE DE LAVADO.

3.7. Proceso de secado del carbón activo

A la salida de la columna de lavado, el carbón activo se encuentra totalmente húmedo a causa del baño de agua al que ha sido sometido. Debe de encontrarse seco, bien para su embalaje o bien para la obtención de material al tamaño deseado por el consumidor (varios tipos de carbón activo granular) conseguido en el molino.

Para ello, se utilizan varios instrumentos con el objetivo de conseguir unas buenas condiciones del producto final para su comercialización.

3.7.1. Secadores

Secadores de tambor

Es un cilindro de chapa soldado, con espesores de 10 a 20 mm según el tamaño de secadero. La longitud del tambor alcanza 50m para diámetros de hasta 5m. La mayoría de las veces se suministran como tambores giratorios apoyados en dos pares de rodaduras (aro – rodillo). Se instalan con una pendiente que va de 3° a 6° y el material recorre el tambor secadero en unos 20 – 40 minutos.

Se puede distinguir 2 tipos:

- *Secadores a contracorriente:*

Son secadores con dirección de traslación opuesta para los gases calientes y el material que se ha de secar, es decir, que los gases ingresan en el secadero por el punto en que el material lo abandona, tal y como se muestra en la figura 20.

La diferencia de temperaturas entre los gases calientes y el material que hay que secar, en conjunto, es más pequeña que en el proceso en que ambas corrientes de gases y material se introducen en la misma dirección. En consecuencia, la eficiencia de desecación en los secaderos a contracorriente es más pequeña que para los de ambas corrientes en la misma dirección.

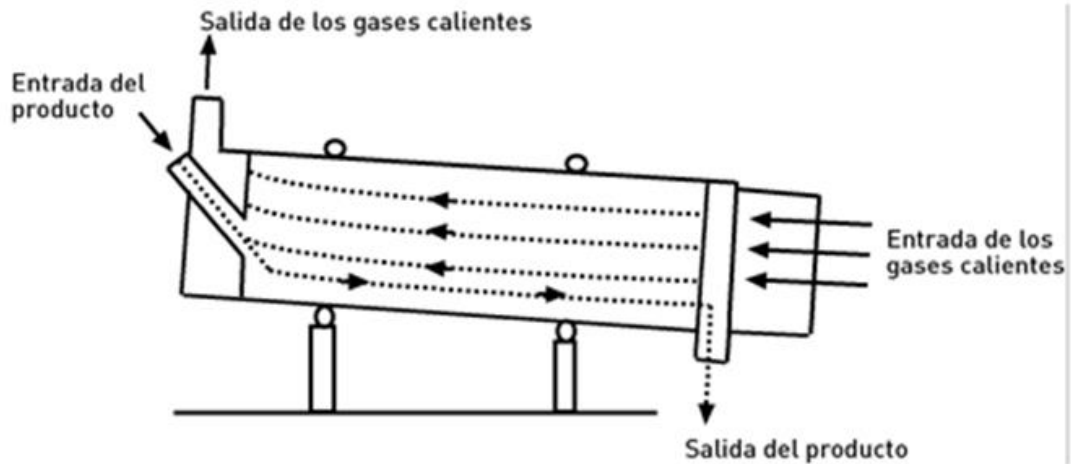


FIG. 24. SECADOR DE TAMBOR A CONTRACORRIENTE.

▪ Secadores con corriente paralela:

En los secadores de este tipo, los gases calientes se enfrentan, de modo inmediato, con el material con toda su humedad y su baja temperatura. Como consecuencia del elevado gradiente de temperatura entre los gases y el material húmedo, se elimina la mayor parte del agua en el primer tramo del tambor y por lo tanto, la evaporación del agua es relativamente pequeña en el resto del secador. En estos secadores, puede elevarse la temperatura de los gases que ingresan en él, sin perjudicar el material que hay que secar, cuando se quiere conseguir una acción de secado más intensa. También se puede regular la humedad final a cualquier valor impuesto por las circunstancias.

En la elección del secador hay que considerar, ante todo, las propiedades físicas del material que se va a secar,

tales como tamaño del grano, tendencia a cambios de estructura durante el secado, comportamiento en la corriente de gases, tiempo de secado, etc.

En la desecación del carbón en secadores de flujo paralelo, se rebaja de modo considerable el peligro de combustión del material. En contracorriente favorece su combustión. Por el contrario, se produce más polvo en el caso de los secadores de flujos paralelos que en los de contracorriente, ya que estos últimos arrastran lejos de la salida del material los polvos/cenizas.

El secador elegido es un secador a contracorriente, ya que el gas utilizado en este proceso es aire a bajas temperaturas, de manera que controlamos la combustión del carbón, y además lo limpiamos de las impurezas (polvo, cenizas,...). De esta manera conectamos a la salida de los gases un ciclón el cual se ocupa de purificar el aire de cenizas (también se podría utilizar un filtro de aire).

Ciclón

Un ciclón consta principalmente de dos partes, una cilíndrica y la otra cónica. El gas entra por la parte alta del cuerpo cilíndrico de manera tangencial y se mueve en espiral a lo largo de la pared hacia abajo, casi hasta la parte inferior del cono (torbellino exterior). Desde aquí comienza a ocupar el espacio interno del ciclón en donde se mueve hacia arriba y también en espiral (torbellino interior). La fuerza centrífuga hace que las partículas de polvo del gas se depositen sobre la pared del ciclón y tanto por la acción de la gravedad como por la del torbellino exterior, se desplazan hacia abajo. La mayor parte de las partículas caen en un colector de donde se extraen mediante una esclusa de sectores por un tornillo sin fin. El torbellino gaseoso que

sube es el gas depurado que, sin embargo, todavía contiene cierta cantidad de finas partículas sólidas.

El rendimiento de un ciclón es inversamente proporcional a su diámetro. Los ciclones con 225, 400, 600 y 3150 mm tienen rendimientos de 96.7, 92.6, 88.2 y 57.5%.

La pérdida de carga de los ciclones está entre los 30-165 mm de la columna de agua y depende de la temperatura del gas, del tamaño del ciclón y la velocidad de entrada del gas.

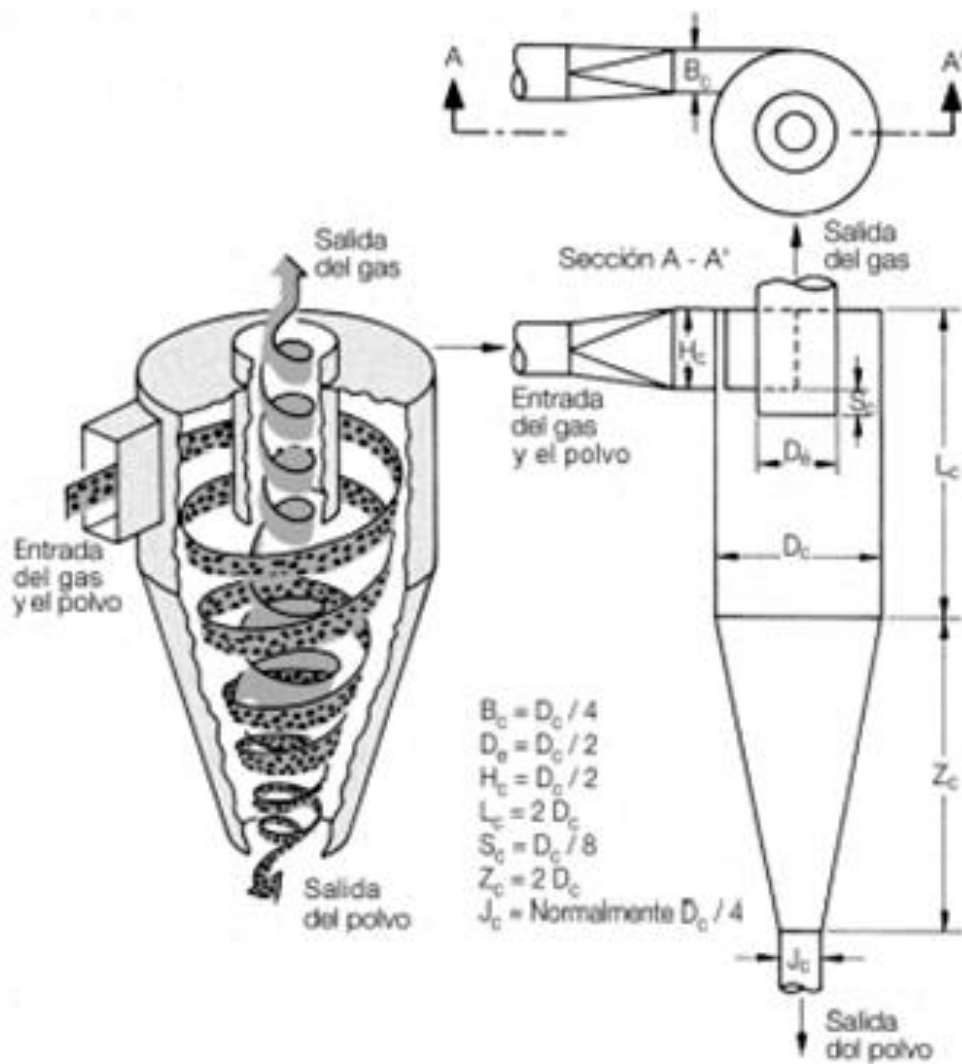


FIG. 25. ESQUEMA DE UN CICLÓN.

3.8. Descripción de los transportes internos

3.8.1. Cintas transportadoras

Los sistemas de cintas transportadoras se emplean cuando los materiales deben ser desplazados en cantidades relativamente grandes entre posiciones específicas de una ruta fija. La mayoría de estos sistemas son impulsados mecánicamente; algunos emplean la gravedad para trasladar la carga entre puntos de diferente altura. Estos sistemas comparten los siguientes atributos:

- Son generalmente mecanizados y a veces automatizados.
- Ocupan posiciones fijas, estableciendo las rutas.
- Pueden estar montados sobre el suelo o suspendidos del techo.
- Casi siempre están limitados a un flujo unidireccional de materiales.
- Generalmente mueven cargas discretas, aunque algunos están preparados para cargas voluminosas o continuas.
- Pueden emplearse sólo para transporte o para transporte más almacenamiento automático de elementos.

Una característica común a las cintas transportadoras es que el mecanismo de avance está construido sobre el mismo camino de la cinta. Los elementos transportadores individuales (si se usan carritos u otros receptáculos) no son impulsados individualmente.

Los diferentes tipos de cintas transportadoras que podemos utilizar en nuestro proceso industrial son:

Cintas con rodillos

Es una forma muy común de cinta. El camino consiste en una serie de tubos (rodillos) perpendiculares a la dirección de avance, como se ilustra en la figura 26. Los rodillos están contenidos en un armazón fijo que eleva la cinta del suelo desde varios decímetros a algo más de un metro. Los pallets planos o bandejas portando la carga unitaria son desplazados a medida que giran los rodillos. Las cintas con rodillos pueden ser impulsadas mecánicamente o gravitatorias. Los sistemas de tipo gravitatorio se disponen de tal modo que el camino desciende una pendiente suficiente para superar la fricción de los rodillos. Las cintas con rodillos pueden ser usadas para el reparto de cargas durante las operaciones de procesado, el reparto hacia y desde el lugar de almacenamiento y aplicaciones de distribución. Los sistemas de cintas automatizados son también útiles para operaciones de clasificación y combinado.



FIG. 26. CINTA CON RODILLOS.

Cinta con ruedas

Operativamente son similares a los rodillos. Sin embargo en lugar de rodillos, pequeñas ruedas como las de los “patines” montadas sobre ejes rotatorios conectados al armazón se emplean para desplazar el pallet, bandeja, u otro contenedor a lo largo de la ruta. Las aplicaciones de este tipo de cintas son similares a las de los rodillos, excepto que las cargas deben ser en general más ligeras al estar los contactos entre carga y cinta mucho más concentrados.

Cintas planas

Este tipo está disponible en dos formatos comunes: cintas planas para pallets, piezas o incluso ciertos tipos de materiales en masa; y cintas huecas para materiales en masa. Los materiales se sitúan en la superficie de la cinta y viajan a lo largo del recorrido de la misma. La cinta forma un lazo continuo de manera que una mitad de su longitud puede emplearse para el reparto del material y la otra mitad para el retorno (generalmente vacío). La cinta se soporta con un armazón con rodillos u otros soportes espaciados entre sí varios decímetros. A cada extremo de la cinta están los rodillos motores (“poleas”) que impulsan la cinta.



FIG. 27. CINTA HUECA.

Cintas con cadenas

Están formadas por lazos de cadena sin fin en una configuración arriba-abajo alrededor de ruedas dentadas motorizadas, en los extremos del camino. Puede haber una o más cadenas operando en paralelo para formar la cinta. Las cadenas viajan a lo largo de canales que proporcionan soporte para las secciones flexibles de la cadena, o bien las cadenas se desplazan por el canal o usan rodillos para montarse al canal. Las cargas generalmente se montan sobre las cadenas.

Cintas con listones

Este sistema emplea plataformas individuales, llamadas listones o tablillas, conectadas a una cadena continua en movimiento. Aunque el mecanismo impulsor es la cadena, funciona en gran medida como una cinta plana. Las cargas se sitúan sobre la superficie plana de las tablillas y se desplazan con ellas. Los caminos son generalmente en línea recta, pero al ser movidos por cadenas y la posibilidad de introducir curvas en el camino mediante ruedas dentadas, las cintas con listones pueden tener giros en su lazo continuo.

Cintas aéreas de carros

Cuando se habla de movimiento del material, un carro es un soporte con ruedas moviéndose en un raíl elevado del que puede colgar la carga. Una cinta con carritos es una serie de múltiples carros igualmente espaciados a lo largo de los raíles mediante una cadena sin fin o cable. La cadena o cable está unida a una rueda que proporciona energía al sistema.

3.8.2. Elevador de cangilones

Para el transporte de carbón activo desde la parte inferior de nuestra planta a la parte superior para el inicio del proceso de impregnación podemos utilizar un elevador de cangilones.

Existen cinco tipos de elevadores de cangilones:

Cangilones montados sobre banda o cadena con descarga centrífuga

La descarga de los cangilones de los elevadores a grandes velocidades de movimiento se efectúa derramando o lanzando la carga en el punto superior del elevador, bajo la acción de la fuerza centrífuga.

Los cangilones están montados, distanciados entre sí a intervalos regulares, sobre ramales sencillos o dobles de cadena, o sobre banda de goma.

El llenado de los cangilones se efectúa directamente, después de pasar estos bajo las ruedas o tambor de la caja tensora inferior. La descarga se realiza por proyección del material, originada por la fuerza centrífuga, como consecuencia de la elevada velocidad de los cangilones.

El diámetro de las ruedas o tambor de la cabeza motriz, la posición de la boquilla de evacuación y la velocidad, son factores importantes para conseguir una correcta descarga del material.

Este tipo de elevadores se utiliza generalmente para manipular materiales de grano fino, que no requieren un especial cuidado y se desprenden fácilmente de los cangilones.

Cangilones montados sobre cadena con descarga positiva

A velocidades menores, cuando el lanzamiento de la carga no tiene lugar, la descarga de los cangilones se efectúa derramando el material al recorrer éstos el piñón de la cadena superior. En este caso, es necesario desviar el ramal libre del elevador para que sea posible la colocación de una artesa receptora debajo de la carga o hacer el elevador inclinado.

Los cangilones están montados muy próximos entre sí, sobre ramales dobles de cadena.

El llenado de los cangilones se efectúa generalmente dragando o directamente, después de pasar éstos bajo las ruedas de la caja tensora inferior.

Debido a la reducida velocidad de la cadena, la descarga se realiza vaciándose los cangilones por gravedad a su paso sobre las ruedas motrices, facilitada por la inversión forzada que provocan las ruedas ceñidoras.

Estos elevadores son apropiados para manipular materiales pulverulentos, ligeros y frágiles, o para aquellos otros de naturaleza pegajosa que fluyen con dificultad.

Cangilones de escama montados sobre banda o cadena

Si es necesario efectuar la descarga derramando el material desde el elevador vertical sin inclinar los cangilones, pueden emplearse los cangilones de escama, cuya pared anterior sirve de canalón para la descarga que se derrama desde el sucediente cangilón. Este tipo de descarga se aplica

en los elevadores de marcha lenta, a una velocidad de movimiento no mayor de 0.8 m/s.

A continuación en la figura 28 un ejemplo de descarga correspondiente a los anteriores tipos de elevador de cangilones.

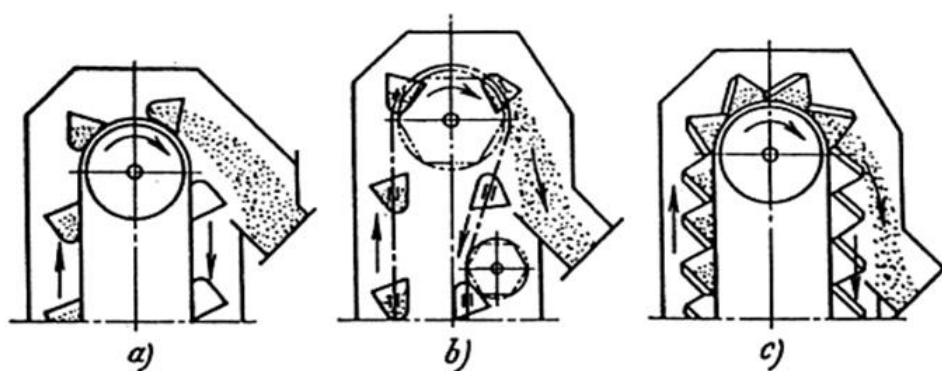


FIG. 28. DESCARGA DE UN ELEVADOR DE CANGILONES: A) POR DESCARGA CENTRÍFUGA; B) POR DESCARGA POSITIVA; C) POR DERRAME A CANGILÓN DE ESCAMA.

Cangilones montados sobre cadena con descarga lateral

Los cangilones están montados, distanciados entre sí a intervalos regulares, sobre ramales dobles de cadena.

El llenado de los cangilones se efectúa generalmente dragando o directamente, después de pasar éstos bajo las ruedas de la caja tensora inferior.

Debido a la reducida velocidad de la cadena y a la especial disposición de los cangilones, la descarga se realiza hacia el interior del elevador, vaciándose éstos por gravedad al quedar invertidos a su paso por las ruedas motrices.

Se recomienda este tipo de levadores para un funcionamiento continuo sometido a duras exigencias y para materiales pulverulentos, frágiles, pesados o abrasivos, de muy variada granulometría.

Cangilones montados sobre banda con doble columna

Los cangilones están montados sobre banda de goma en una o varias hileras, pareados al tresbolillo y distanciados entre sí a intervalos regulares.

El llenado de los cangilones se efectúa por proyección del material, originada por la fuerza centrífuga, como consecuencia de la elevada velocidad de la banda.

El tambor motriz es de mayor diámetro que el tensor, manteniendo la estabilidad de la banda un rodillo de inflexión próximo a la caja tensora inferior.

Su estructura está formada por dos conductos, uno para el ramal ascendente y otro para el descendente.

Están especialmente indicados para importantes alturas de elevación y grandes capacidades, utilizándose para materiales de gran influencia y resistentes a la fracturación que pueden admitir elevadas velocidades.

3.8.3. Otros tipos de transporte

Transportadores de rosca

También llamados de tornillo (sin fin o de Arquímedes) o vises transportadores, se usan para el manejo de materiales granulados o pulverizados a granel en trayectorias horizontales o suavemente inclinadas. El material es empujado a lo largo de un conducto. Debido al movimiento relativo simultáneo del elemento transportador, sea la hélice o las aletas, se produce rozamiento contra las paredes del conducto y con la hélice, por lo que el consumo de energía es bastante elevado.

El sentido de avance del material va determinado por el sentido de rotación del eje y/o por el sentido de la hélice. Así pues, para un mismo eje en un sentido de rotación dado, es posible usar un mismo transportador en dos direcciones opuestas. En general, un transportador de rosca puede alimentarse en cualquier punto, descargando en aberturas provistas de compuertas. La capacidad de transporte de una rosca se determina en función del diámetro de la hélice, su paso, su velocidad de rotación, el grado de llenado y la naturaleza del material que se maneja. Este último parámetro es muy importante y constituye la base de una subdivisión en tres clases:

- Ligeros, no abrasivos, sueltos y fluentes, tales como harina de crudo, granos y carbón pulverizado y seco. Con estos materiales es posible trabajar a grandes velocidades y con un llenado hasta 45 %.
- Materiales de grano fino o de troceado menudo, que no fluyen libremente, tales como el carbón, la sal gruesa, etc. Para estos materiales se admite un llenado de 30 %.
- Recientemente agresivos, materiales duros que pueden contener terrones resistentes, con malas propiedades de flujo, tales como las cenizas, arena y cemento. En este caso el grado de llenado es de 15 %.

La ventaja de las roscas transportadoras reside en su compacta forma de construcción. Por ello son muy convenientes para el manejo de sustancias polvorientas, tóxicas, explosivas o malolientes, porque el conducto puede ser cerrado a los escapes de polvo o gases y resistente a presiones externas o internas. Permiten su uso como alimentadores, dosificadores, llenado de silos tolvas, mezclados, etc. Las desventajas son las grandes pérdidas energéticas por rozamiento y los pesados desgastes, con una elevada exigencia para el accionamiento.



FIG. 29. TRANSPORTADOR DE ROSCA.

Transporte neumático

En manipulación de sólidos, el transporte neumático es el trasvase de materiales sólidos en grano o pulverulentos encerrados en tuberías con la impulsión de un gas. La clasificación de los diversos tipos de transporte sigue dos ejes: En primer lugar, según el origen del gas, si impulsa el material será impulsión, si el gas se aspira será succión o aspiración. En segundo lugar, los transportes neumáticos se clasifican según la dilución de las partículas dentro del gas. Hablaremos de fase diluida cuando el producto este en disolución en la tubería y de fase densa cuando la cantidad de material sea grande [18].

El transporte de sólidos, en medio portante gaseoso generalmente aire, ha adquirido una importancia considerable en la industria. Una ventaja especial consiste en que se puede conjugar la operación del transporte con la interacción del gas y el material transportado comprendida en varios procesos fisicoquímicos. Otra de sus propiedades estriba en la simplicidad de su construcción, buena adaptabilidad, total ausencia de partes móviles en todo el

trayecto del transporte, ausencia de emisión de polvo, exigencias muy modestas en su mantenimiento, resistencia a la intemperie y, lo que no es menos importante, su adaptabilidad a la marcha automatizada. Un inconveniente del transporte neumático, en general, es su gran consumo de energía y, con ciertos materiales, el desgaste por rozamiento de los conductos transportadores con el material circulante.

Hay diversos sistemas de transporte por aire, que emplean unos la aspiración o succión y otros la presión o impulsión.

Transporte por succión o aspiración (por vacío)

En las instalaciones basadas en aspiración, se crea mediante una bomba, un enrarecimiento del aire, a través del cual el material es aspirado hacia el interior de un tubo que se sumerge en él. El material es separado de la corriente de aire mediante un separador interpuesto en el punto deseado. El aire, a la salida del separador, necesita pasar por un limpiador o depurador antes de dejar que pase a la bomba aspiradora.

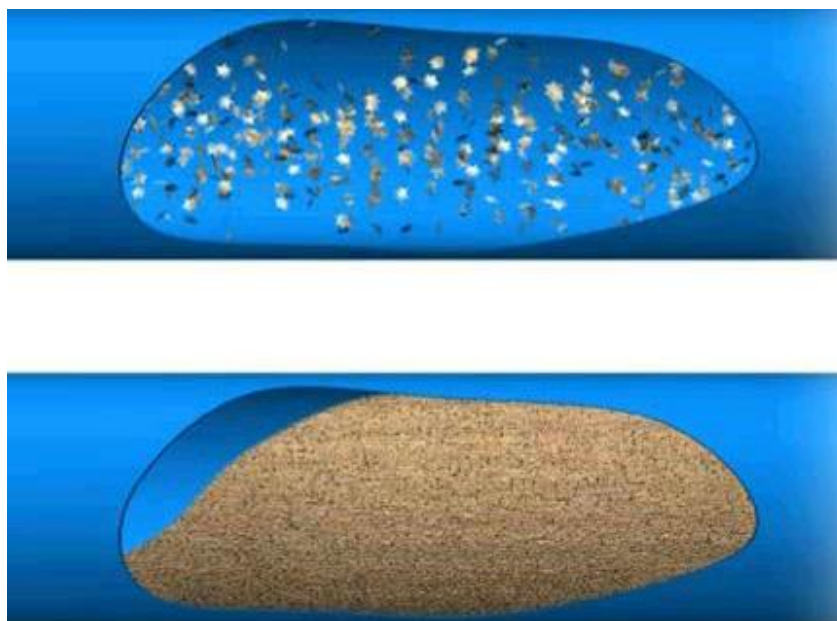


FIG. 30. TRANSPORTE NEUMÁTICO: A) FASE DILUIDA; B) FASE DENSA.

3.9. Almacenamiento del carbón activo

El carbón activo ya secado, es dirigido a los tanques de almacenamiento mediante transportes articulados. Éstos están dotados con sistemas de elevación neumática y asimismo, con sistemas de descarga neumática con sus aparatos para la regulación del caudal.

Se almacena con el objetivo de disponer de él para distintos compradores. Dependen de las posibilidades de su expedición por ferrocarril, camiones o barcos, y corresponde a la empresa evaluar los procedimientos más convenientes, ya que dependiendo del comprador el carbón activo es suministrado o bien en sacos o bien a granel. En el caso del suministro a granel en camiones cisternas, estos son llenados directamente desde los silos de almacenamiento o transportado hasta las dosificadoras de producto en almacén de carga. Para este almacenamiento, se emplean silos. El volumen que es capaz de albergar en su interior será elegido por la empresa según sea el tamaño de su producción. Será suficiente para el almacenamiento de la producción de la empresa.

Ya se cargue de una manera o de otra, es preciso cuidar de que la operación se verifique sin desprendimiento de polvo y previniendo en la instalación un sistema de filtración ampliamente calculado.

La carga exige que la manipulación de los sacos se haga con cuidado. No deben sufrir ningún choque ya que cada saco roto es una pérdida de carbón activo y una elevación del precio de coste.

3.9.1. Ensacado y carga del carbón activo

Ensacado del carbón activo

Desde el silo de almacenamiento, se lleva el carbón activo a la zona de ensacado mediante transportadores articulados.

Ensacador rotativo

Antiguamente se utilizaban los sacos de yute, pero en la actualidad se emplean los sacos de papel que se llenan con máquinas ensacadoras de una o varias bocas dispuestas en fila, o en máquinas rotatorias [19].

En la actualidad, estas máquinas ensacadoras únicamente son usadas para capacidades de llenado de hasta 80 T/h dependiendo del peso del saco. Por encima de las 120 T/h, la máquina más usada es el ensacador rotativo automático compuesto por 6 boquillas de llenado como el de la figura 31.

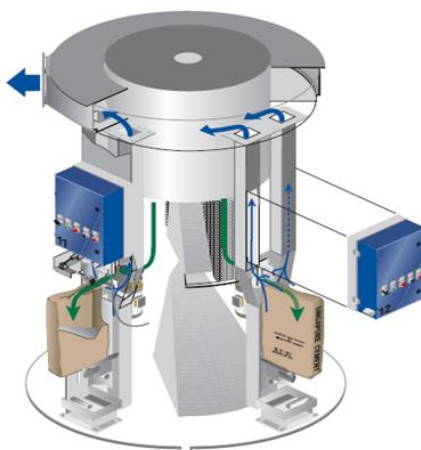


FIG. 31. ENSACADOR ROTATIVO.

Los sacos de carbón activo son almacenados en “palets” mediante una paletizadora automática y colocados una encima de la otra en una nave de almacenaje. Estas cargas

son sacadas mediante carretillas elevadoras (toros mecánicos) y cargadas en vehículos para su expedición.

Ensacador en línea con alimentación por gravedad

Un modelo más común de productoras en cadena y sin pausa. Especialmente indicada para el ensacado en sacos o bolsas de boca abierta tipo SOS, planos o con fuelles laterales de pequeño contenido de 1,5 a 25 kg, según densidad y dimensiones del saco.

Admite sacos de papel y complejos (plástico y aluminio) o de plástico; de una o más capas, preferentemente con satinado exterior para facilitar la manipulación del saco mediante vacío; y de las siguiente características:

- Parte superior: Con o sin asa o troquel.
- Fondo: Cosido o encolado (Pinch, SOS).
- Lateral: Con fuelle.

Apropiado para aquellas que requieren el máximo nivel de automatización y fiabilidad en la línea de envasado.

Encuentra su principal aplicación en industrias elaboradoras de comida para animales domésticos, sepiolitas, carbón, etc (figura 32) [20].



FIG. 32. ENSACADORA AUTOMÁTICA PARA SACOS DE BOCA ABIERTA EN LÍNEA.

Carga del carbón activo a granel

En la carga a granel, el carbón activo se conduce mediante vises transportadores, aerodeslizadores o aparatos neumáticos a los vagones o camiones situados sobre plataformas-báscula, y cuando se ha alcanzado el peso deseado, el chorro de producto se interrumpe automáticamente.

El principal componente de un sistema de carga a granel es el grupo de carga, (comprendiendo la envoltura interior, con puertas para la extracción de polvo), la manguera de carga de doble fuelle (alternativamente se puede emplear un tubo telescópico de acero), la tobera de punta cónica (para su entrada en la boca de carga del vehículo-tanque de transporte granel formando un cierre hermético al polvo) y el indicador del nivel de llenado.

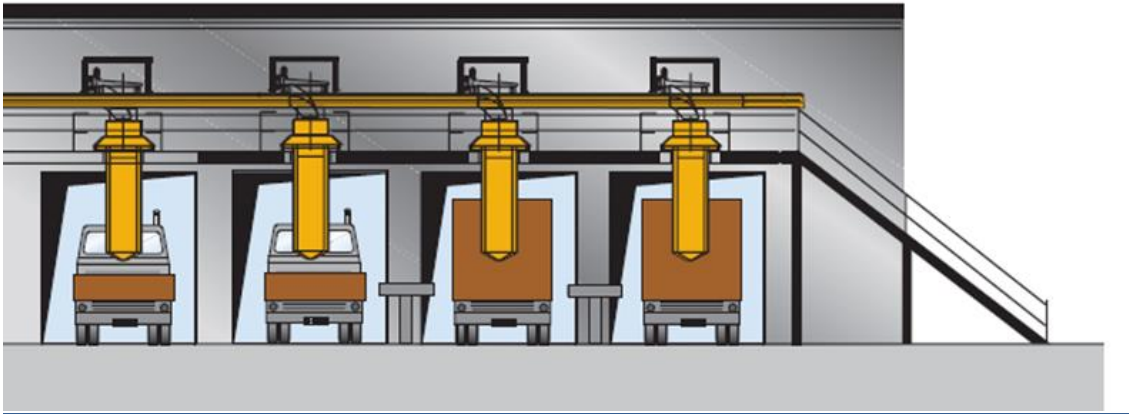


FIG. 33. CARGA A GRANEL DEL CARBÓN ACTIVO.

3.10. Bombas y tuberías

3.10.1. Tuberías

Tuberías de acero inoxidable

La resistencia mecánica es una de las razones por las que se eligen las tuberías de acero. Ningún otro material empleado en instalaciones de conducción de fluidos alcanza las cotas de resistencia mecánica que tienen los tubos de acero y los accesorios de fundición maleable.

La Resistencia a la corrosión es otra de las causas por las que existe esta opción. Los recubrimientos inoxidables tanto exteriores como interiores, que se obtienen por inmersión en caliente en baño de cromo y zinc a diferentes concentraciones, sobre los tubos de acero y accesorios de fundición maleable, proporcionan una protección muy eficaz al metal de base contra la corrosión.

Durante la inmersión se produce la difusión del zinc y el cromo en la superficie del hierro o acero, dando lugar a la formación de diferentes capas de aleaciones cromo-zinc-hierro. Estas capas de aleaciones quedan recubiertas por una capa de cromo-zinc puro al extraer el material del baño de cromo-zinc. Las aleaciones formadas son más duras incluso que el acero y la capa externa de cromo-zinc puro más blanda, lo que hace al conjunto formar un sistema amortiguador muy resistente a los golpes y a la abrasión.

En la protección que proporciona el recubrimiento galvanizado intervienen tres mecanismos:

- Efecto barrera: El logrado por el impedimento físico que supone el galvanizado para alcanzar al metal base.

- Autopasivación: El zinc y el cromo y las aleaciones cromo-zinc-hierro tienen facilidad para pasivarse. Los productos de corrosión, que son carbonatos de zinc hidratados, son insolubles en agua, muy adherentes y poco porosos y forman rápidamente una finísima película sobre la superficie del tubo y el accesorio muy estable, que aísla el recubrimiento galvanizado, impidiendo el progreso de la corrosión del zinc.
- Protección catódica: El zinc es un metal electroquímicamente más negativo que el hierro, lo que hace que la corrosión se localice en él en vez de en el hierro, permitiendo asegurar que mientras quede recubrimiento de zinc sobre la superficie del tubo o accesorio, éste los seguirá protegiendo contra la corrosión.

Este efecto inoxidable, que se conoce como protección catódica hace que si por cualquier circunstancia (golpe, raspadura, etc) queda al descubierto alguna zona del metal base, ésta estará protegida por la aleación cromo-zinc adyacente.

Tuberías de PVC

El poli (cloruro de vinilo) o PVC (del inglés Poly (vinyl chloride)) es un polímero termoplástico.

Se presenta como un material blanco que comienza a reblandecer alrededor de los 80 °C y se descompone sobre 140 °C. Es un polímero por adición y además una resina que resulta de la polimerización del cloruro de vinilo o cloroeteno. Tiene una muy buena resistencia eléctrica y a la llama.

En la industria existen dos tipos:

- Rígido: para envases, ventanas, tuberías, las cuales han reemplazado en gran medida al hierro (que se oxida más fácilmente).
- Flexible: cables, juguetes, calzados, pavimentos, recubrimientos, techos tensados...

El PVC se caracteriza por ser dúctil y tenaz; presenta estabilidad dimensional y resistencia ambiental. Además, es reciclable por varios métodos.

Las características que pueden presentar las tuberías de PVC son:

- Perfecta estanqueidad en todas las condiciones.
- Resistencia. Ofrecen una alta resistencia tanto al impacto como a la tensión.
- Resistencia química. Los accesorios de PVC son resistentes a una gran variedad de elementos químicos.
- Durabilidad.

Tuberías de cobre

El cobre cristaliza en el sistema cúbico de cara centrada, lo que permite un fácil deslizamiento molecular que le aporta las características de dúctil y maleable.

Como características más destacadas del tubo de cobre, se pueden reseñar las siguientes:

- Alta resistencia a la corrosión.
- Pequeñas pérdidas de carga, debido a una superficie interior lisa. Inalterable con el paso del tiempo, en sus características físicas y químicas.
- Permite montajes rápidos y fáciles, utilizando diversos tipos de accesorios, tales como los soldados por capilaridad, a compresión, y uniones en frío.

- Excelente comportamiento con la gran mayoría de los materiales de construcción habituales y de los fluidos a transportar.
- Soporta elevadas presiones interiores, permitiendo el uso de tubos de pared delgada.

3.10.2. Bombas

Existen varios tipos de bombas, como rotativas, de pistón, peristálticas,...Pero en el proceso se trabaja únicamente con bombas centrifugas. A continuación, se explica los modelos disponibles ofrecidos por el comerciante GRUNDFOS.

Bombas centrífugas circuladoras

Bombas centrifugas sencillas, muy silenciosas, diseñadas para la recirculación de agua fría o caliente en los sistemas de climatización y agua caliente sanitaria. Se trata de bombas de rotor húmedo donde el propio fluido refrigera el motor.

Aplicaciones. Circulación de agua caliente o fría en:

- Sistemas de calefacción.
- Sistemas de agua caliente sanitaria.
- Sistemas de refrigeración y aire acondicionado.

Características y ventajas:

- Libre de mantenimiento.
- Silenciosa.
- Bajo consumo.
- Amplia gama.
- Cuerpo de bomba en acero inoxidable, latón o bronce, resistente a la corrosión (según tipo de bomba).

Bombas centrífugas monocelulares

A continuación se describen las características más destacables de los elementos principales de las bombas centrífugas:

- **Rodete:** El rodete o impulsor es el elemento principal de las turbo máquinas. Su diseño se realiza de forma que para el punto nominal de funcionamiento, el flujo circule por los canales formados por los álabes sin choques y optimizando al mínimo el momento cinético del flujo a la salida. Las bombas centrífugas suelen tener entre 5 y 9 álabes. Cuantos más álabes se forman más canales, y el flujo es mejor conducido por los mismos tomando mejor la componente de velocidad deseada. Por el contrario, los álabes disminuyen la sección de paso y forman más superficies donde existirá fricción.
- **Voluta:** Se trata de un canal de sección creciente que rodea al rodete, recogiendo el fluido que sale del mismo. La misión de la voluta es la de reducir la energía cinética del flujo de forma ideal (sin pérdidas) de forma que esta energía pase a presión estática.

Aplicaciones. Las bombas son adecuadas para el trasiego de líquidos en:

- Plantas de calefacción de distritos.
- Sistemas de refrigeración y aire acondicionado.
- Plantas industriales.

Bombas centrífugas multicelulares

Aplicaciones. Las bombas son adecuadas para el trasiego de líquidos en:

- Máquina herramienta por electroerosión.
- Centros de mecanización.
- Lavadoras industriales.
- Sistemas de filtrado.
- Tornos.
- Transportador de barro de amolado.
- Control de temperatura.
- Alimentación de calderas.
- Sistemas de tratamiento de agua.
- Aumento de presión de aguas de proceso.
- Calefacción y refrigeración en procesos industriales.
- Sistemas de aire acondicionado.

Características y ventajas:

- Longitud de instalación flexible.
- Fiabilidad.
- Mantenimiento fácil.
- Instalación sencilla.
- Pequeñas dimensiones.
- Gran rendimiento.

Las bombas centrífugas monocelulares y multicelulares están diseñadas para caudales elevados a presiones altas.

3.11. Empresas productoras de carbón activo

3.11.1. Cabot Norit activated carbon

La historia de Cabot Norit Activated Carbon se remonta a principios del siglo XX. En 1910, se utilizó, para decolorar, un mineral de carbón vegetal que consiste en 96 a 98 por ciento de carbono puro conocido como 'noir épuré', 'eponit' o 'Norit' en el proceso de refinado de azúcar. Dr. A. Wijnberg, profesor de la Escuela de la Industria Azucarera, se le ocurrió la idea de que este carbono para decoloración en particular podría ser utilizado para el refinado de azúcar [21].

En 1910, se reunió Wijnberg JNA Sauer, quien ya había participado activamente en la industria azucarera durante varios años. El 15 de mayo de 1912, se fundó la Norit Witsuiker Maatschappij (Norit Blanco Sugar Company) en Ámsterdam, Holanda. Estos son considerados como los padres fundadores de Cabot Norit Activated Carbon.

En los años 1915 y 1916, una empresa de fabricación que trabajaba con dos hornos, se erigió en Zandaam, que tenía un excelente acceso al puerto de la madera local. La fábrica, con una capacidad de producción anual de 150 a 200 toneladas al horno, entró en producción en abril de 1916.

El 28 de enero de 1918, Norit se constituyó en Ámsterdam, como la Algemene Norit NV Maatschappij - General de Norit Company - y obtuvo la aprobación real sólo cuatro meses más tarde. Desde 1918, la oficina central de Norit se encuentra en Ámsterdam. En 1975, se trasladó a Amersfoort, Holanda.

En 1924, adquirió la planta de Norit purit en Klazienaveen, que fue fundada en 1921 y se utiliza como materia prima la turba disponible en la zona.

En 1933, la primera fábrica en los EE.UU. se estableció en Jacksonville, Florida. Un año más tarde, la Norit Company americana comenzó la producción de carbón activado a partir de carbón vegetal obtenido mediante la incineración de los tocones de árboles de pino. En 1966, la producción en Florida fue detenida y la Norit Company americana se convirtió en una organización de ventas. En 1968, Norit fue comprado por Clydesdale química y su planta de producción en Glasgow, Escocia, que produce carbón activo a partir de serrín. La planta original fue posteriormente cerrada y una nueva planta de producción se construyó y se puso en funcionamiento en 1982.

En 1984, Norit construyó una nueva unidad de reactivación en Ravenna, Italia, como parte de la estrategia corporativa para aumentar las soluciones sostenibles de carbón activo que continúa hasta nuestros días. En 1992, otra unidad de reactivación se abrió junto con Bristol Water en Purton, Reino Unido, que se convirtió en totalmente propiedad de Norit a finales de 2004. También en 1984, Norit compro a ICI, Darco y su planta de producción en Marshall, Texas que producía carbón activo a partir de lignito. En 1996, Norit adquirió una fábrica de carbón activo en Pryor, Oklahoma en Elf Atochem. En 1997, Norit entró en un 49% de joint-venture con CLARIMEX, un productor de carbón activo a base de madera en México.

En 2008, Norit estableció una empresa conjunta con Norit Canadá Sheritt / Prairie Minas de Canadá con el fin de satisfacer la demanda cada vez mayor de carbono para la eliminación del mercurio en Canadá y América del Norte.

En 2010, Norit tenía ocho empresas fabricantes diferentes, incluyendo las empresas de tecnología de proceso limpio (CPT) integrados bajo el paraguas de Cabot. En 2011, Norit vendió las empresas CPT a Pentair.

En 2012, Norit fue adquirida por Cabot Corporation, líder mundial en especialidades químicas y materiales de alto rendimiento. Negocio que ahora se conoce como Cabot Norit Activated Carbon.

3.11.2. Grupo Clarimex

Constituido por las empresas Clarimex, S.A. de C.V. en México y Brascarbo Agroindustrial, Ltda. en Brasil, es el mayor fabricante de carbón activo en América Latina y el Caribe, y líder en ventas de carbones pulverizados en la región, además de exportar a Estados Unidos, Europa y África.

En 1997 Clarimex y NORIT -el mayor fabricante de Carbón Activo en todo el Mundo, con plantas en Estados Unidos, Escocia y Holanda- alcanzan una importante asociación estratégica [22]. Fabricante de carbón activo a través de madera y obtenido por deshidratación química mediante ácido fosfórico, pensado específicamente para procesos de decoloración en industria química y farmacéutica, refinado de azúcar, glucosa y aceites vegetales, producción de zumos, vinos y vinagres, etc...

Clarimex es, también, productora de carbones activos mediante vapor a partir de mineral lignítico y bituminoso destinados al tratamiento de agua, así como de carbones activados a partir de cáscara de coco para su aplicación tanto en tratamiento de agua potable como para tratamiento de aire y gases.

3.11.3. Brascarbo

Es una joven empresa brasileña, que desde 1998 forma parte del Grupo Clarimex. Con una capacidad de producción superior a las 15.000 t/año de carbón de madera activado con vapor, sus productos están específicamente diseñados para la adsorción de contaminantes en agua potable y residual y en el tratamiento de emisiones atmosféricas.

3.11.4. Donau carbon

Donau carbon GmbH es una filial de Donau Chemie, que desde el año 2001 años continua con las actividades de Lurgi Aktivkohle.

Dispone por lo tanto de más de 80 años de experiencia en la fabricación y recomendación de carbón activo para diversas aplicaciones, como por ejemplo, el tratamiento de agua potable, con las marcas Hydraffin y Carbopal [23].

El proceso de activación de los carbones Hydraffin y Carbopal, se realiza mediante vapor en atmósfera controlada a un mínimo de 900°C y bajo la entera responsabilidad de calidad de la sede de Donau Carbon en Frankfurt.

Así mismo Donau carbon dispone de dos plantas propias de reactivación con una capacidad de aproximadamente 5000 t/año ubicadas de Frankfurt, Alemania y Pichelsdorf, Austria.

Con las marcas Supersorbon, Desorex o Biovox, Donau dispone de una completa gama de carbones activados específicamente diseñados para el tratamiento de aire, gases y emisiones atmosféricas.

3.11.5. Carbotecnía

Empresa heredera de una historia que se inició en Guadalajara, México, en 1987 con la instalación en Norteamérica de la primera planta de activación a partir de cáscara de coco.

Después de algunos años dedicados a la producción de carbón de cáscara de coco estándar, incursiona en el ramo de los carbones especiales, tales como impregnados, bacteriostáticos, ultrapuros e ingeribles. Asimismo, con la colaboración de investigadores del más alto nivel mundial, implementa la fabricación de carbones de superficie modificada para retener compuestos que no adsorbe un carbón activado común [24].

Entre las principales áreas de aplicación de estos productos están: respiradores de cartucho químico, eliminación en fase gas de compuestos no adsorbibles por un carbón estándar, recuperación de compuestos orgánicos volátiles, control ambiental, tratamiento de personas intoxicadas, refinado de todo tipo de bebidas, purificación de gases industriales y tratamiento de aguas residuales.

3.11.6. Chemviron Carbon

Es la unidad de operaciones europea del grupo Calgon Carbon Corporation (NYSE: CCC), productor y proveedor global de carbón activo granular, que trabaja además en el desarrollo de sistemas de tratamiento de depuración de alta tecnología, ofreciendo servicios para la optimización de los procesos de producción y purificación [25].

Nuestra empresa está dotada de las más avanzadas instalaciones industriales y laboratorios, donde nuestro equipo de expertos desarrolla nuevas tecnologías de procesos y estudian la continua optimización de nuestra gama de productos.

Desde el tratamiento de agua potable hasta el tratamiento de aguas residuales, el control de olores, o a la fabricación y procesado químico y farmacéutico. Chemviron Carbon tiene la experiencia y la capacidad necesarias para ofrecerle un servicio de alta calidad, que dará mayor valor a su negocio cada día y en cualquier lugar del planeta.

Chemviron Carbon produce un amplio abanico de carbón activo en polvo, pellets y granulado, incluyendo productos impregnados o con lavado ácido para uso en múltiples aplicaciones de aire, gas, agua y diversos procesos. Con aproximadamente 220 empleados en las instalaciones de Bélgica, Chemviron Carbon tiene representación comercial en Alemania, Francia, España e Inglaterra, así como una extensa red de Agentes distribuidores en Europa, África y Oriente Medio [26].

En Feluy, aproximadamente a 50 km al sur de Bruselas, Chemviron Carbon tiene el mayor centro de reactivación del mundo, permitiendo que el carbón activo sea continuamente reciclado. En Grays (Reino Unido), se dispone de otro centro

de reactivación y una planta de producción para la fabricación de productos especiales.

Nuestro Departamento Técnico, con sede en Bélgica, proporciona todo tipo de soluciones para su proceso o aplicación. Un servicio técnico que se encuentra respaldado por un experto equipo de ingenieros y técnicos, con modernos laboratorios donde se desarrollan multitud de aplicaciones.

Charcoal Cloth International, ubicado en Newcastle (Reino Unido) produce carbón activo en tejidos para un rango especial de aplicaciones.

Chemviron Carbon posee la certificación ISO 9001 para la fabricación, venta y distribución de carbón activo y la reactivación de productos, así como para la fabricación de carbón activado en tejidos y el diseño, gestión de proyectos y fabricación de equipos.

Todos los centros de fabricación poseen además, la certificación ISO 14001 sobre la producción y suministro de carbón activo, incluyendo su reactivación. Esto muestra la gran dedicación de la compañía en la identificación y corrección de los agentes causantes del impacto ambiental, con el objetivo final de seguir mejorando ante su compromiso con medio ambiente.

4. APLICACIONES

Aplicaciones adsortivas

La adsorción es un proceso de separación y concentración de uno o más componentes de un sistema sobre una superficie sólida o líquida. Los distintos sistemas heterogéneos en los que puede tener lugar la adsorción son:

- Sólido-Líquido.
- Sólido-Gas.
- Líquido-Gas.

Como en otros procesos de este tipo, los componentes se distribuyen selectivamente entre ambas fases.

La adsorción constituye uno de los procesos más utilizados dentro de los sistemas de tratamiento terciario de las aguas residuales. Se emplea, fundamentalmente, para retener contaminantes de naturaleza orgánica, presentes, en general, en concentraciones bajas, lo que dificulta su eliminación por otros procedimientos. Cabe citar la eliminación de compuestos fenólicos, hidrocarburos aromáticos nitrados, derivados clorados, sustancias cloradas, así como otras que comunican olor y sabor a las aguas. La operación es menos efectiva para sustancias de pequeño tamaño molecular y estructura sencilla, que suelen ser fácilmente biodegradables y, por ello, susceptibles de tratamiento biológico.

Entre los aspectos positivos de la adsorción como método de tratamiento de aguas residuales cabe señalar:

- Capacidad para trabajar eficazmente a concentraciones bajas de contaminante.
- Flexibilidad frente a las variaciones de caudal y concentración.

- Moderadas necesidades de espacio. Facilidad de automatización.
- Posibilidad de regenerar el adsorbente.
- Posibilidad de recuperar sustancias retenidas cuando ello resulte de interés económico.

Como aspectos negativos:

- Costo de operación. Que suele ser comparativamente alto y, por esta razón, su empleo queda restringido, en general a los casos de necesidad o a otros en que convenga reutilizar las aguas tratadas o, como se ha indicado, recuperar algún producto de las mismas [27].

El carbón activo es el adsorbente más versátil por su alta superficie específica, distribución polimodal de tamaños de poro, estructura porosa en forma de rendija y por su capacidad de presentar diferentes tipos de naturaleza química en su superficie. Es necesario mencionar que aunque sólo alrededor de un 20% del carbón activo producido está destinado a aplicaciones en fase gaseosa, suele ser mucho más caro, y en cuanto a costo supone alrededor del 40% del valor total del carbón activo vendido. La mayor parte de este carbón es granular o conformado y las principales aplicaciones son:

- Recuperación de disolventes.
- Control de las emisiones de vapores de gasolina.
- Control de gases industriales.
- Separación de gases.
- Eliminación de olores en depuradoras de aguas residuales.
- Soporte de catalizadores.

4.1. Adsorción de compuestos en fase gaseosa

Una de las mayores aplicaciones en fase gas consiste en la eliminación de gases tóxicos de una corriente gaseosa, como dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno, disulfuro de carbono y compuestos órgano sulfurosos. Las emisiones de SO_2 no sólo son un problema ecológico, sino que desde el punto de vista económico cada vez más se reutiliza para la obtención de ácido sulfúrico. Las principales fuentes de emisión de SO_2 son las centrales térmicas de carbón, altos hornos y plantas petroquímicas. Los carbones activos juegan un papel importante en la eliminación de SO_2 de una corriente toxica. Si en esta corriente no hay oxígeno ni agua, se produce una adsorción física del SO_2 en el carbón. Si hay agua y oxígeno, se produce una oxidación catalítica en la superficie del carbón a SO_3 , y en presencia de agua a ácido sulfúrico.

Otra aplicación importante es la recuperación de disolventes orgánicos de una corriente gaseosa residual, como benceno, xileno, tolueno, acetona, alcoholes, alcanos saturados, etc.

También se utiliza como filtro en tratamientos de olores, filtro de máscaras de gas protección de vías respiratorias, filtros de cigarrillos, etc.

Entre los sistemas compuestos por carbones activos con sustancias depositadas que juegan un papel importante como catalizadores de muchas reacciones en fase gaseosa, los carbones activos impregnados merecen especial atención. Son capaces de proteger las vías respiratorias humanas contra sustancias toxicas e incluso mortales que pueda haber en el aire. Las sustancias impregnadas son compuestos de

metales como Cu, K, Na, Zn, Co, Mn, V y Mo, así como compuestos orgánicos como piridinas y aminas aromáticas. Dependiendo del adsorbato, el proceso de adsorción de gases tóxicos sobre la superficie del carbón activo impregnado puede ser de tres formas:

- Adsorción física.
- Quimiadsorción.
- Reacción química, con formación de compuestos no tóxicos o de menor toxicidad.

De esta forma mediante filtros de carbón activo impregnado en máscaras de gas, pueden retenerse compuestos muy tóxicos como HCN, AsH₃, CNCl, etc.

4.2. Adsorción en fase líquida

Los carbones activos que se utilizan en aplicaciones en fase líquida difieren fundamentalmente de los de fase gaseosa en la distribución de tamaños de poros, puesto que los primeros deben tener un mayor volumen de macroporos para facilitar la difusión de los líquidos a lo meso y microporos. La aplicación puede requerir carbón activo en polvo, granular o conformado, y la selección se basa fundamentalmente en el grado de purificación que se requiera.

Para sus aplicaciones en fase líquida, se pueden considerar los siguientes sectores:

- *Industria alimentaria, farmacéutica y química.* Debido a este sector se inició la industria del carbón activo a comienzos de este siglo. Hoy en día representa alrededor del 40% del total de la producción del carbón activo. Tanto el CAP como el CAG son utilizados. El proceso de purificación es

la aplicación más importante dentro de este sector, de forma que entre otros usos se puede utilizar para:

- Decoloración de vinos y azúcares.
- Purificación de antibióticos.
- Vitaminas y otros productos farmacéuticos.
- Eliminación de olores y colores de comidas y bebidas.

- *Tratamiento de aguas.* El consumo de carbones activos destinado a la aplicación de este sector supone un 40% total del mercado.

El proceso de potabilización de aguas para el consumo humano supone un 20% del total, tanto en carbón activo granular como en polvo. Históricamente, el CAP ha sido utilizado durante muchos años como agente para eliminar sabores y olores. Últimamente, el CAG se utiliza también con este propósito, generalmente en procesos con doble finalidad (como adsorción y filtración). Debido a las regulaciones medio ambientales, especialmente en los países desarrollados, la eliminación de los tri-halogenometanos y productos orgánicos sintéticos se ha convertido en un objetivo primordial.

También se utilizan carbones activos para purificar aguas subterráneas o de aljibes. Para esta aplicación suele utilizarse el CAG, bien en cámaras de lecho fijo como en cámaras de lecho móvil.

En el tratamiento de aguas residuales, ya sean, municipales como industriales, el uso del carbón activo, tanto CAP como CAG, está muy extendido.

Finalmente, aplicaciones de tratamiento de aguas menos importantes son filtros de agua domésticos (impregnado con Ag), limpieza de acuarios, tratamiento de piscinas, etc.

4.2.1. Tratamiento de aguas para consumo humano

El carbón activo es un sólido que tiene dos propiedades que lo han hecho muy útil en el tratamiento de aguas. La primera consiste en que el carbón activo retiene los compuestos orgánicos disueltos no eliminados por la degradación biológica natural, microcontaminantes y ciertos metales pesados a nivel de trazas, con una avidez tal que destruya el cloro libre residual que no ha reaccionado después de que dicho compuesto realizó una acción desinfectante.

En estas funciones se ha considerado desde hace muchos años la tecnología más rentable. Debido a ello, prácticamente todas las industrias que requieren agua potable utilizan carbón activo como uno de los procesos básicos de purificación.

El carbón activo tiene capacidad para lograr estados de equilibrio tales, que la concentración de los compuestos adsorbibles en el agua llega a niveles indetectables por los métodos de análisis comunes. Todo esto, aunado al hecho de que las fuentes de abastecimiento de agua potable normalmente tienen cantidades relativamente pequeñas de materia orgánica, hace del carbón activo la mejor alternativa técnica y económica para su control.

Factores que influyen en la adsorción de compuestos presentes en el agua

El tipo de compuesto que desee ser eliminado. Los compuestos con elevado peso molecular y baja solubilidad se adsorben más fácilmente.

La concentración del compuesto que desea ser eliminado. Cuanta más alta sea la concentración, más carbón se necesitará.

Presencia de otros compuestos orgánicos que competirán con otros compuestos por otros lugares de adsorción disponibles.

El pH del agua. Por ejemplo, los compuestos ácidos se eliminan más fácilmente a pH bajos.

4.2.2. Compuestos orgánicos

En general, cuanto menos soluble en el agua es un compuesto orgánico, mejor se adsorbe a partir de su disolución. Análogamente, el compuesto menos polar es el mejor adsorbido a partir de sus soluciones acuosas polares, sobre carbón poco o nada polar [28].

Ambas reglas cualitativas surgen de la necesidad que tiene una molécula orgánica de romper las uniones disolvente-adsorbato para poder adsorberse. Estos enlaces son generalmente más fuertes cuando el adsorbato es muy soluble en el agua o presenta con este disolvente una interacción dipolo-dipolo.

Las moléculas orgánicas son, en general, las menos solubles, y tienden a difundirse más lentamente a través de los poros, adsorbiéndose con mayor dificultad cuanto más

grandes sean, al no poder penetrar fácilmente en los poros más pequeños.

Otros factores relacionados con la adsorción de compuestos orgánicos tienen que ver con las afinidades químicas específicas entre los grupos funcionales del adsorbente y el adsorbato.

La tabla 8 presenta una relación de compuestos orgánicos según su mayor o menor capacidad para ser adsorbidos por carbón activo. Los fenoles sustituidos, por ejemplo, se adsorben mejor que los halometanos o el etileno. Estos compuestos orgánicos volátiles son disolventes industriales, a menudo presentes en altas concentraciones. Su eliminación es difícil o requiere frecuentes regeneraciones de los lechos.

TABLA 8. TIPOS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS SEGÚN SU CAPACIDAD DE ADSORCIÓN SOBRE CARBÓN ACTIVO.

COMPUESTOS ORGÁNICOS FACILMENTE ADSORBIBLES
<p>Disolventes aromáticos: Benceno, Tolueno, Nitrobencenos, etc.</p> <p>Aromáticos clorados: PCBs, clorobencenos, cloronaftaleno.</p> <p>Fenol y Clorofenoles: Aromáticos policíclicos, Benzopirenos, etc.</p> <p>Pesticidas y Herbicidas: DDT, aldrin, clordane, BHCs, heptaclor, etc.</p> <p>Clorados no aromáticos: Tetracloruro de carbono, ésteres cloroalquílicos, hexaclorobutadieno, etc.</p> <p>Hidrocarburos de alto peso molecular: Tintes, gasolina, aminas, compuestos húmicos.</p>
COMPUESTOS ORGÁNICOS POCO ADSORBIBLES
<p>Alcoholes.</p> <p>Cetonas de bajo peso molecular, ácidos, aldehídos.</p> <p>Azúcares y almidones.</p> <p>Coloides orgánicos de peso molecular muy alto.</p> <p>Alifáticos de bajo peso molecular.</p>

Los hidrocarburos policíclicos aromáticos y las nitrosaminas se adsorben rápidamente. Como quiera que no suele haber mucha información disponible sobre la adsorción de las especies orgánicas con carbón activo granular, es con frecuencia necesario realizar ensayos en tanque o en columna en laboratorio, antes de pasar a predecir la eficacia en la eliminación de tales compuestos en un lecho a gran escala. La mayoría de los compuestos poco adsorbibles son muy solubles y de peso molecular bajo; pero también hay

otros de peso molecular muy elevado. En el caso de los ácidos orgánicos y de las bases, la adsorción depende mucho del pH, eliminándose preferentemente las moléculas de tipo neutro.

Virus

La adsorción de virus sobre carbón activo ha sido estudiada como un proceso para el tratamiento avanzado de aguas residuales y su posible reutilización. Los grupos funcionales específicos del carbón, como el carboxilo y la lactona, se cree que actúan como “sitios” para la adsorción de virus. El grado de adsorción depende en gran medida del pH, por lo tanto, la atracción electrostática entre los grupos cargados negativamente sobre el carbón y los grupos cargados positivamente sobre los virus es importante. Los estudios en laboratorio y planta piloto no son aún bastante consistentes y han demostrado que la eliminación de los virus con carbón activo es difícil de controlar.

En resumen, debe preverse el empleo de carbón activo cuando se deseen eliminar *contaminantes orgánicos* disueltos, tales como:

- Detergentes.
- Colorantes de síntesis solubles.
- Disolventes clorados.
- Fenoles y derivados hidroxilados.
- Derivados aromáticos, sustituidos o no, especialmente derivados clorados o nitrados.
- Benceno.
- Tolueno.
- Trihalometanos.
- Pesticidas.

Y compuesto inorgánicos, tales como:

- Cloro libre.
- Ozono.
- Yodo.
- Arsénico (en complejos orgánicos).
- Cromo (en complejos orgánicos).
- Mercurio (en complejos orgánicos).

Estéticos, tales como:

- Color.
- Olor y sabor.
- Espuma (sustancias activas al azul de metileno).

4.2.3. Compuestos inorgánicos

Algunos compuestos inorgánicos pueden eliminarse por adsorción sobre carbón activo. Metales a nivel de trazas, como el mercurio, el arsénico y el plomo pueden ser eliminados con carbón activo granular. La tabla 9, presenta una lista de metales según su grado de adsorción. La mayoría de los cationes y aniones presentes en las aguas naturales no se adsorben, como es el caso del calcio, sodio, ortofosfatos, nitratos y haluros. Una excepción es el fluoruro, que es eliminado, tanto por alúmina activada como con carbón.

Los metales pueden reaccionar en los grupos funcionales oxigenados del carbón, desplazando a los iones de hidrogeno por intercambio iónico. Las superficies del carbón también pueden dar lugar a precipitados de sales metálicas por nucleación o coagulación. Los metales reducidos en la estructura original del carbón también pueden reaccionar con los metales en estado iónico en disolución, para reducirlos hasta una forma depositable.

Análogamente, los metales pueden ser oxidados catalíticamente.

TABLA 9. METALES Y COMPUESTOS INORGÁNICOS CLASIFICADOS POR SU POTENCIAL ADSORCIÓN SOBRE CARBÓN ACTIVO.

Metales fácilmente adsorbibles: Antimonio, arsénico, bismuto, cromo, estaño.	
Metales de potencial de adsorción medio: Plata, mercurio, cobalto, zirconio.	
Metales de potencial de adsorción menos bueno: Plomo, níquel, titanio, vanadio, hierro.	
Metales con bajo potencial de adsorción: Cobre, cadmio, zinc, bario, selenio, molibdeno, manganeso, tungsteno (volframio), radio.	
Otros compuestos Inorgánicos	Adsorción potencial
Nitrato	Baja
Fosfato	Baja
Cloro	Baja
Bromo	Baja
Iodo	Baja
Cloruro	Baja
Bromuro	Baja
Ioduro	Baja
Fluoruro	Baja

4.3. Otras aplicaciones

4.3.1. Aplicaciones catalíticas

Aunque supone tan solo un 5% del total de consumo, una gran atención en el campo de la investigación se dedica a la utilización de carbones activos como catalizadores. Algunas de las aplicaciones de uso más relevante son electrodos de pilas, catalizadores para recuperación de metales preciosos, eliminación de sustancias tóxicas, etc.

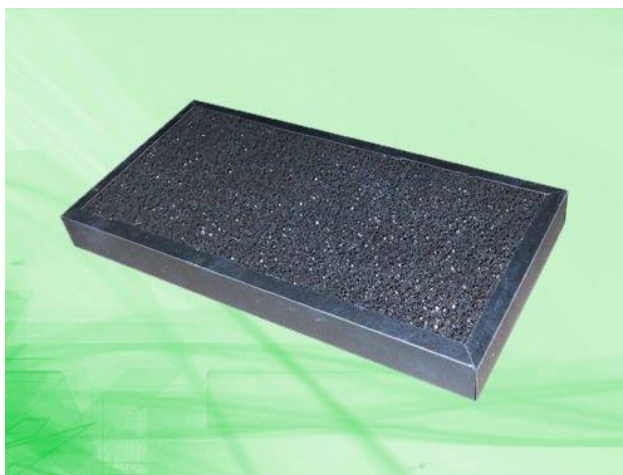


FIG. 34. CARBÓN ACTIVO COMO CATALIZADOR.

4.3.2. Aplicaciones médicas

El carbón activo es utilizado como agente adsorbente para tratar envenenamientos y sobredosis de ingestión oral. Previene la absorción del veneno en el estómago. La dosificación típica para un adulto es de 30–50 g. Las dosis pediátricas son de 12–25g. El uso incorrecto de este producto puede producir bronco aspiración (ingreso en los pulmones) y puede dar lugar a un desenlace fatal si no es controlado. Para el uso fuera del hospital, se presenta en comprimidos de 1 g, o en tubos o botellas plásticas, comúnmente de 12.5 ó 25 g, premezclados con agua.

4.4. Equipos de adsorción

Los equipos utilizados para aplicar estos principios a la adsorción son variados y dependen de la aplicación del proceso. Es muy característico de muchas operaciones por lotes. El líquido que se va a procesar y el adsorbente están mezclados íntimamente en el tanque de tratamiento a la temperatura deseada y durante el periodo requerido; después se filtra la fina colada para separar el adsorbente sólido y el adsorbato que acompaña el líquido. También se utiliza la agitación con aire, como en los tanques del burbujeo, particularmente en el caso de intercambio iónico. El equipo se adapta fácilmente a la operación en varias etapas colocando tantos tanques y filtros adicionales como sea necesario. Si la operación se va a realizar en forma continua, lo cual algunas veces se hace al decolorar aceites lubricantes de petróleo, por ejemplo, pueden sustituirse las centrifugas o el filtro giratorio continuo por el filtro prensa, o bien se puede dejar que el sólido se sedimente, en virtud de un tanque grande. El tipo de adsorbente utilizado depende de la disolución por tratar. Con frecuencia, las disoluciones acuosas se tratan con carbón activo, preparado especialmente para el uso que se le va a dar; los líquidos orgánicos, como aceites, generalmente se tratan con adsorbentes inorgánicos, como arcillas. A veces se utilizan adsorbentes mixtos. Se desea elevada selectividad frente al soluto que se va a separar, con el fin de reducir la cantidad de sólido que agregará. De cualquier manera, el adsorbente se aplica en forma de un polvo medio molido muy finamente, de ordinario lo más finamente posible para que pase a través de una malla 200; con frecuencia es más fino todavía.

Como la cantidad de disolución que generalmente se trata es muy grande en comparación con la cantidad de

adsorción que ocurre de ordinario puede ignorarse el aumento de temperatura provocado por desprendimiento del calor de adsorción.

El método para manejar el adsorbente utilizado depende del sistema particular que se esté considerando. La torta de filtración generalmente se lava para desplazar a la disolución retenida dentro de los poros de la torta; relativamente poco adsorbato se eliminará de esta manera; si el adsorbato es el producto deseado, puede desorberse por contacto del sólido con un disolvente en que el adsorbato sea más soluble.

Esto puede hacerse lavando la torta en el filtro, o dispersando el sólido en cierta cantidad del disolvente. Si el adsorbato es volátil, puede desorberse haciendo que la presión parcial del adsorbato sobre el sólido se reduzca al pasar vapor o aire caliente a través del sólido. Para evitar la combustión de carbón en el caso de adsorbente de carbón activo, se evitan las temperaturas elevadas al utilizar aire con este fin. En la mayoría de las operaciones de decoloración, el adsorbato no tiene valor y es difícil desorberlo. Entonces, el adsorbente puede volverse a activar quemando el adsorbato y reactivándolo después. Generalmente, solo es posible llevar a cabo unas cuantas activaciones de este tipo antes de que se reduzca severamente el poder del adsorbente. En este caso, el sólido se desecha [29].

4.4.1. Lecho móvil

Lecho móvil flujo establecido: Las composiciones de las fases en cualquier punto de la columna no cambian con el tiempo pero se tienen gradientes continuos de concentraciones en ambas fases a lo largo de la columna. Su aplicación más frecuente es la separación de hidrocarburos en la industria del petróleo.



FIG. 35. ADSORCIÓN A CONTRACORRIENTE CONTINUA.

4.4.2. Lecho fluidizado

Se aplica el fluido Q_1 a una velocidad tal que mantenga en suspensión las partículas del adsorbente sin sacarlas de las columnas. El lecho expandido mantiene una caída de presión sensible constante. En estado establecido, los sólidos se pueden agregar continuamente por arriba y remover por abajo.



FIG. 36. COLUMNA DE ADSORCIÓN DE LECHO FLUIDIZADO.

4.4.3. Lecho fijo

Este es el más empleado en la práctica para tratar grandes gestos. La alimentación puede ser con flujo ascendente o descendente y la concentración dentro de la columna varia en espacio y tiempo.

Cuando se va a alcanzar la capacidad de adsorción del sólido, este se regenera y se vuelve a usar.

Operación de flujo ascendente: una porción del adsorbente se remueve periódicamente del fondo y una cantidad igual regenerada se agrega por arriba.

Operación de flujo descendente: todo el contenido de la columna se regenera después de agotarse.

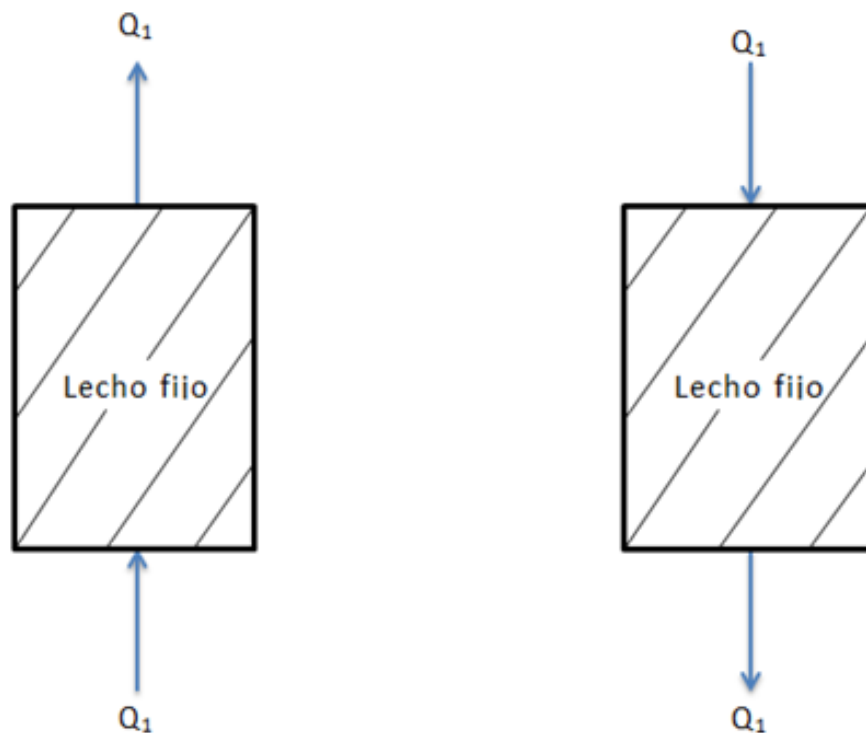


FIG. 37. FLUJO ASCENDENTE Y FLUJO DESCENDENTE.

Con frecuencia, las columnas de carbón activo más utilizadas son la de lecho móvil o la de lecho fluidizado. En la figura 38, se muestra de forma esquemática, una columna de carbón activo granular típica empleada en el tratamiento de agua residual.

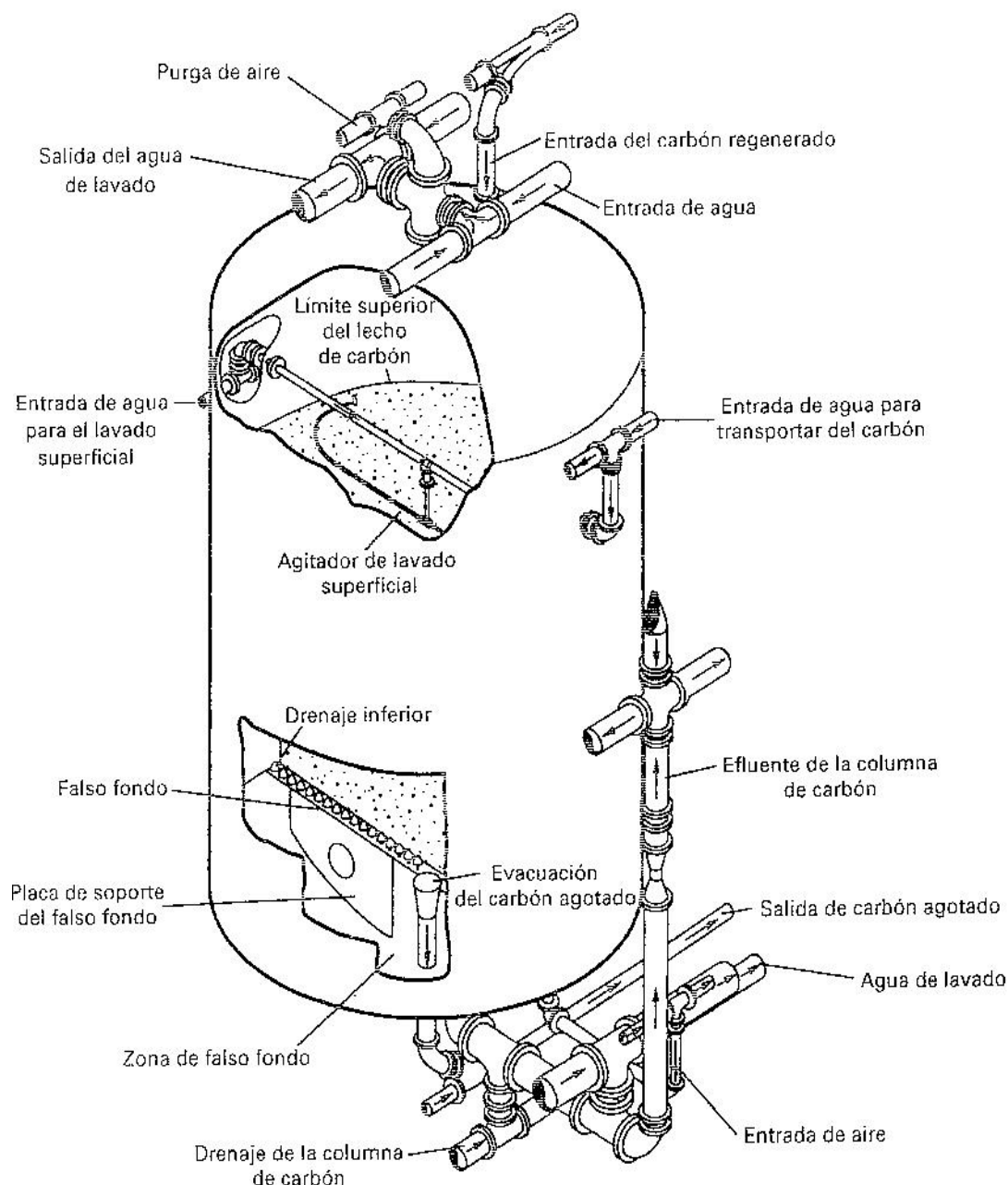


FIG. 38. COLUMNA DE ADSORCIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON CARBÓN ACTIVO GRANULAR.

5. REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO

Cuando el carbón activo ha sido utilizado durante algún tiempo o simplemente transcurre largo plazo desde su producción, sin que su conservación haya sido muy esmerada, pierde su poder retentivo, convirtiéndose en un producto de momento inservible, pero que puede recobrar sus anteriores propiedades si se le somete a un tratamiento adecuado, que recibe los nombres de “regeneración” o “reactivación”.

Una vez que el carbón activo ha sido saturado con los componentes que debe adsorber en una aplicación industrial, puede ser regenerado mediante una serie de procesos, para así recuperar su estado original. Las ventajas de la regeneración son, principalmente, el que se produce el costo para el usuario y que se reduce considerablemente el problema de la eliminación o almacenamiento del material gastado. La duración de este tipo de filtros depende del volumen de gases o líquidos a tratar, y de la cantidad de moléculas a retener.

En la regeneración hay que atender a dos cosas distintas: en primer lugar, debe purificarse el carbón de todas las sustancias extrañas que le acompañan, y, en segundo lugar, hay que procurar no perder carbono.

La regeneración puede realizarse “in situ”, en la propia instalación del usuario o, más frecuentemente, en los sistemas de regeneración de los propios fabricantes. El método más simple de regeneración es la desorción de las sustancias adsorbidas por tratamiento térmico o por desgasificación [30].

5.1. Tipos de regeneración

El carbón activo es un producto caro . En la mayoría de los casos el coste de sustituir el carbón saturado sería prohibitivo. Debe por lo tanto ser regenerado, y cuatro métodos se han desarrollado para este propósito:

El método más simple de regeneración es la desorción de las sustancias adsorbidas por tratamiento térmico o por desgasificación [31].

En la tabla 10, se recopila y describen los métodos de regeneración más comunes. El de regeneración biológica es un método de regeneración, el cual, todavía no se ha aplicado a escala industrial.

TABLA 10. TÉCNICAS DE REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO.

PROCESO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
TÉRMICO	Se calienta en agua una corriente de gas en un horno múltiple de chimenea típico, a una temperatura entre 850 – 1000 °C	<ul style="list-style-type: none"> - Para fase Gas y Líquida. - Especies fuertemente adsorbidas. - Recuperación de sustancias de alta concentración. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coste elevado. - Elevadas temperaturas: No puede estar “in situ”. - No es útil en ciclos rápidos. - Pérdida de capacidad.
BIOLÓGICO	El carbón activo contiene bacterias en sus Macroporos	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor tiempo de vida del carbón Activo. - Mayor eficacia en la reducción de materia orgánica. 	<ul style="list-style-type: none"> - La actividad biológica sin control comporta una sobreproducción de biomasa, y es necesaria una gran desinfección posterior.
EXTRACCIÓN CON DISOLVENTE	Desplazamiento de la sustancia adsorbida mediante una corriente líquida o gaseosa.	<ul style="list-style-type: none"> - Ciclos rápidos. - Sólo hay pérdida de capacidad en los primeros ciclos. 	<ul style="list-style-type: none"> - No hay destrucción de los contaminantes. - Elección difícil del disolvente. - Disolventes: Caros y nocivos

5.1.1. Regeneración por vapor

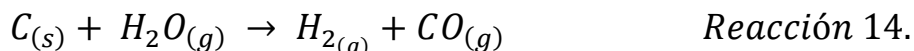
Este método se restringe para la regeneración de carbón el cual ha retenido solamente algunos productos muy volátiles. Lo que se suele hacer es pasar una corriente de vapor de agua sobrecalentado o de gas inerte a alta temperatura a través del lecho de carbón. Este procedimiento es la base del proceso de recuperación de disolventes y del sistema PSA (pressure swing adsorption, lo que traducido al español significa, variación de la presión de adsorción) utilizado en la separación de mezclas de gases.

Aunque cualquier tipo de horno es adecuado para la regeneración, los tipos preferidos por la mayoría de las industrias son el de *solera múltiple o el rotatorio*. Aunque es cierto que hoy día es posible regenerar cualquier tipo y porosidades, para aplicaciones como por ejemplo, el almacenamiento de gas natural.

En los *hornos de tipo rotatorio*, el carbón avanza a contracorriente con una mezcla de gases de combustión y vapor sobrecalentado. Las pérdidas de carbón pueden llegar hasta el 10% por regeneración, por lo que al cabo de unas 10, 11, incluso 12 regeneraciones, se habrá sustituido, estadísticamente, toda la masa de carbón inicial.

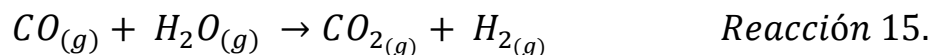
En los *hornos de múltiples etapas* el carbón es calentado hasta una temperatura suficientemente elevada (900 – 930 °C) en una atmósfera aire-vapor (reactivación térmica con baja concentración de oxígeno para evitar que se inflame el carbón, para quemar el monóxido de carbono y el hidrógeno producido por la reacción de reactivación. Se recupera del 90 al 95 % del material, con una capacidad de adsorción algo inferior a la del nuevo carbón.

Las reacciones (13-14) necesarias para la regeneración son:



A temperaturas superiores a los 760 °C, estas dos reacciones son endotérmicas, de manera que las reacciones son fáciles de controlar si se controla la aportación de calor.

El monóxido de carbono puede reaccionar con el vapor de agua donante según la reacción 15:

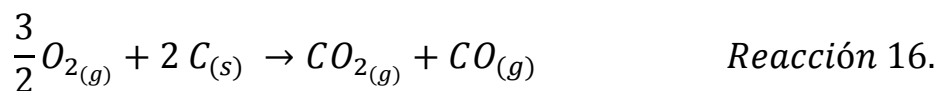


Cuyas constantes de equilibrio a diferentes temperaturas tienen el valor de:

$$K_{eq} = 1.0 \text{ (870 °C).}$$

$$K_{eq} = 0.7 \text{ (980 °C).}$$

Por otro lado, hay que minimizar la oxidación directa del carbón a CO_2 , controlando la concentración de oxígeno en el reactor, mediante la reacción 16:



Esta reacción es exotérmica y al ser portadora de calor, es autopromotora y difícil de controlar. De esta manera, el oxígeno es más propenso a atacar la superficie de base del

carbón activo, alterando la distribución del volumen del poro e incrementando la pérdida del carbón activo.

El horno debe ir provisto de dispositivos de control de atmósfera y de temperatura, de un sistema de deshidratación a la entrada y de un temple del carbón a la salida del horno.

El sistema de transporte y regeneración se ocupa del movimiento del carbón hacia y desde el horno de regeneración, incluyendo la fase de regeneración de éste y de la introducción y transporte del carbón fresco de nuevo al sistema.

En la figura 39 se represente de forma simplificada los principales elementos de una instalación para la regeneración de carbón activo gastado:

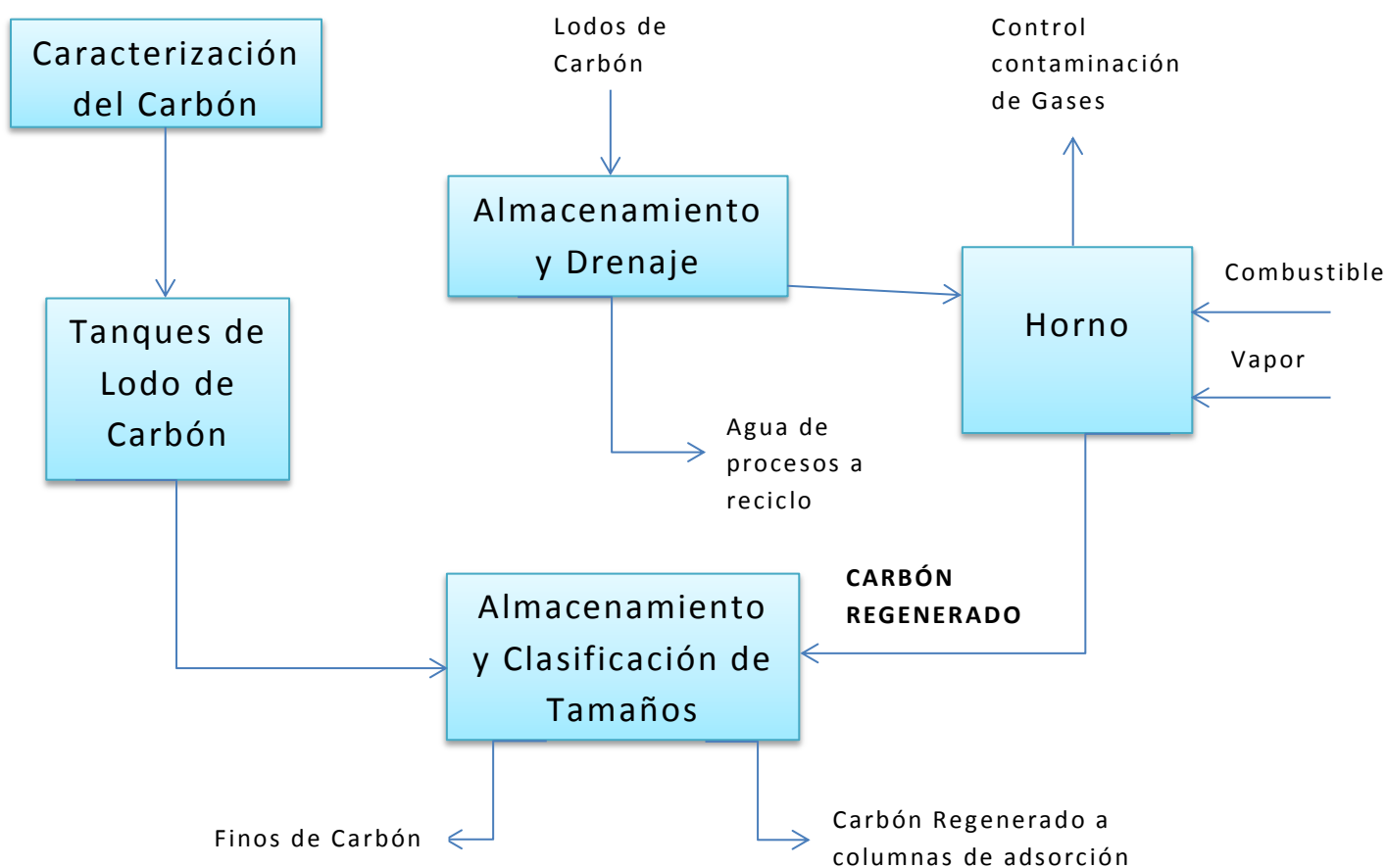


FIG. 39. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO.

5.1.2. Regeneración química

Cierto proceso basado en la acción de un disolvente usado a una temperatura aproximadamente de 100 °C y con altos pH.

En la regeneración química del carbón activo, el HCl da en general mejores resultados que la sosa caustica o el carbonato de sosa, tanto en lo que se refiere al incremento de la actividad del carbón, como a la disminución de cenizas. Se puede aumentar más el efecto de la regeneración por medio de una cocción preliminar del carbón sumergido en agua.

La regeneración química debe comprender las operaciones siguientes:

- Cocción del carbón activo, sumergido en agua, durante 1 hora.
- Cocción de la suspensión del carbón activo en la lejía de sosa, durante 1 hora.
- Cocción de la suspensión de carbón activo en HCl, durante 1 hora.
- Calcinación en un horno a 600 °C.

5.1.3. Regeneración térmica

La regeneración térmica se basa en un proceso de pirólisis y uno posterior de quitar con soplete las sustancias orgánicas adsorbidas. En orden de evitar la ignición del carbón, este es calentado alrededor de los 800 °C en una atmósfera controlada, pero tiene dos desventajas:

- Requiere la inversión considerable de calor en cualquier horno de múltiple-calor.
- Causa altas pérdidas de carbón.

5.1.4. Procesos alternativos de regeneración

También para la regeneración del carbón activo en polvo, se pueden usar *hornos infrarrojos*. Este tipo de hornos, que funcionan desde 1973, a escala piloto en principio y posteriormente con capacidades de hasta unas 15 t/día, permiten la regeneración del carbón activo en polvo. El proceso es similar al carbón granular, vaciando el valor de algunas magnitudes en el sistema de alimentación y de otros parámetros específicos relacionados con las condiciones para la regeneración óptima. Debido a la mayor densidad de la torta de carbón activo en polvo se requieren tiempos de residencia superiores a los correspondientes al carbón activo granular.

En muchos casos, el carbón activo en polvo agotado contiene cantidades importantes de materiales combustibles, debidos sobre todo al “lodo” formado durante el tratamiento de las aguas residuales. En este caso puede ser de interés la combustión de una parte de estas materias volátiles dentro del horno, reduciéndose así el consumo de energía de éste. Como se ha dicho, hay que controlar muy bien la cantidad de aire alimentado a la combustión, así como las pérdidas de carbón por oxidación.

Hay diversos sistemas de hornos de infrarrojos en diferentes estados de diseño y desarrollo, con distintos tamaños y para variadas aplicaciones.

Parece ser que en la regeneración del carbón activo (granular o en polvo), los hornos de infrarrojo tienen algunas ventajas derivadas del propio control del proceso, así como económicas, en cuanto el capital inmovilizado necesario y los costes de operación y mantenimiento, que son comparativamente reducidos [32].

La regeneración biológica todavía no ha pasado de las pruebas a nivel de laboratorio.

***DESCRIPCIÓN
DEL PROCESO***

6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

6.1. Localización de la planta: Comunicación y transporte

En la ubicación de las industrias de producción de carbón una de las premisas más importante es la cercanía a las zonas de obtención de su materia prima con el fin de abaratar los costes en el transporte y evitar, entre otras, posibles dificultades, como la posibilidad de quedarse sin materia prima con la que trabajar.

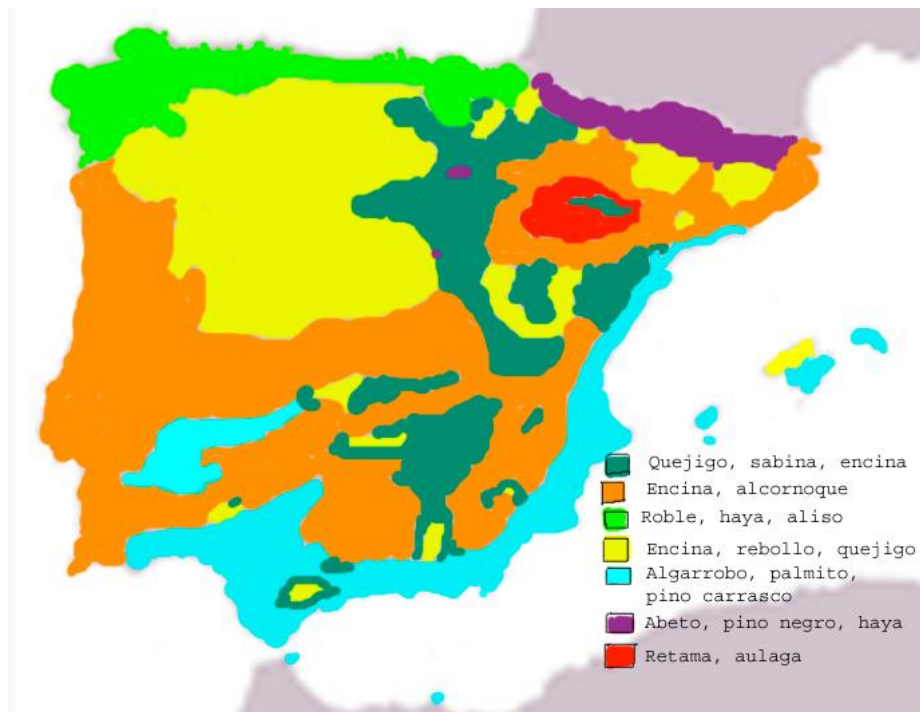


FIG. 40. ZONAS BOSCOSAS ESPAÑOLAS.

Para la obtención de carbón activo de esta planta, se va a utilizar la madera de pino como materia prima. Por lo tanto, la cercanía de la industria a zonas boscosas del país será la idea fundamental para elegir su ubicación.

El objetivo mercantil, a corto plazo, es a nivel nacional. Por eso se busca una ubicación en la cual las conexiones entre ciudades sean óptimas, que las vías de comunicación sean buenas y actuales. Además que las distancias para toda la Península Ibérica sean las menores posibles, de ahí que interese una posición central, además de la primera de nuestras premisas de ubicar la planta cerca de la fuente de nuestra materia prima, la madera de pino. También, por esto mismo, se debe elegir una zona boscosa cualificada para este proceso y donde no haya riesgo, tanto de escasez, como de incendios en épocas de calor. Se descarta la zona sur del país donde las temperaturas en periodo estival son las más elevadas del territorio español y el riesgo de incendios es alto.

Juntando todas las premisas, la fábrica de carbón activo se decide ubicar en Huesca (Aragón). Más concretamente en la plataforma logística industrial Huesca-Sur.

La Plataforma Logístico-Industrial Huesca Sur (PLHUS) está ubicada al sur de Huesca, en la autovía A-23 a unos pocos kilómetros del casco urbano y en las inmediaciones del importante centro de actividad que se ha venido consolidando en los últimos años alrededor del Parque Tecnológico Walqa, representando una importante apuesta por el desarrollo económico de la ciudad y del denominado corredor Huesca-Zaragoza, puesto que nació con el objetivo de potenciar el desarrollo industrial del eje Huesca-Zaragoza.

Este polígono industrial, cumple todos los requisitos de los cuales la empresa necesita: Excelentes infraestructuras y adecuada comunicación, bien con la capital Oscense, bien con el resto de capitales del país. Además de ser una zona boscosa, y por el clima del norte de España, ideal para el proceso continuo de la empresa y la obtención de madera durante todas las épocas del año.

“PLHUS” ofrece todos los requisitos necesarios para hacer llegar el producto con rapidez a cualquier parte del país para su posterior comercialización, así como obtener en buenas condiciones las materias primas necesarias para el procedimiento de la planta.

Huesca se encuentra a 66 km de Zaragoza, conexión principal de las principales capitales del país. Además Huesca está cerca del norte del país pudiendo acceder fácilmente a Bilbao. En Aragón se entrecruzan los principales itinerarios del norte del País con el resto de la península. Es un emplazamiento óptimo como centro de transporte, en los modos por carretera y ferrocarril.

Además, teniendo tan cerca Zaragoza, e incluso Madrid y/o Bilbao pueden enviarse pedidos por medio aéreo con las principales capitales del país, y da la posibilidad de ampliar, en un futuro, el envío a territorio extranjero.

En cuanto a las infraestructuras, el polígono cuenta con red de saneamiento e instalación del abastecimiento de agua, telecomunicaciones y electricidad, y estructuras como depósito de agua tratada o edificio de potabilización. El polígono ha experimentado importantes mejoras en relación con el asfaltado, la iluminación o la mejora de las comunicaciones [33].



FIG. 41. MAPA DE LA PLATAFORMA LOGÍSTICA INDUSTRIAL HUESCA-SUR, HUESCA.

Para la entrada de materia prima cuenta con la autovía A-23 que une Huesca con Jaca y a partir de ahí un conjunto de nacionales que engloban toda la zona pirenaica donde se encuentran entre muchos otros, los pinares de los que se extraerá la materia prima.

La Plataforma cuenta con espacio para uso industrial, viales y aparcamientos, zonas verdes, equipamientos y zona ferroviaria. Además, destaca por la facilidad de acceso, alta calidad en las infraestructuras, equipamientos y servicios, equipamientos públicos, así como por la integración de usos y alta calidad y funcionalidad, como se puede ver en la figura 42.



FIG. 42. IMAGEN AÉREA DEL TERRITORIO DE PLHUS, HUESCA.

En la figura 43 vemos en el mapa de Huesca, donde está situada la zona exactamente del polígono.



FIG. 43. MAPA DE HUESCA.

Gracias a la web del ayuntamiento de Huesca se obtiene información técnica del polígono (figura 44), con la cual podemos decidir donde exactamente colocamos nuestra planta.

Ficha Técnica

Características del Polígono		Infraestructuras del Polígono	
TIPO DE SUPERFICIE	METROS CUADRADOS	TIPO INFRAESTRUCTURA	DISPONE
Superficie total	1.157.062 m2	Pavimentación	si (aglomerado asfáltico)
Superficie ocupada	332.064 m2	Iluminación	si
Superficie libre	327.790 m2	Abastecimiento de agua	si (agua potable)
Superficie mínima de parcelas	500 m2	Suministro de gas	si
Superficie máxima de parcelas	200.000 m2	Suministro eléctrico	si
Número de parcelas	156 m2		
Número de parcelas libres	94		
Número de parcelas ocupadas	62		

FIG. 44. INFORMACIÓN TÉCNICA DE LA PLATAFORMA LOGÍSTICA INDUSTRIAL HUESCA-SUR.



FIG. 45. SITUACIÓN DE LA PARCELA ELEGIDA.

La parcela elegida (fig. 45) es la de mayor tamaño, abarcando una superficie de 20 ha. Lo cual, será suficiente para albergar toda la planta y una posible futura ampliación de esta.

6.2. Materias primas y reactivos

El precursor: La madera

La madera es un material muy rico en carbono (50%) y oxígeno (42%), completada por hidrógeno (6%) y nitrógeno (2%). Así al someterla a altas temperaturas (Carbonización) se forman carbohidratos, dejando un material carbonoso como resultado. También se puede decir que la madera se constituye de:

- **Celulosa (40–50) %:** La celulosa es un biopolímero compuesto exclusivamente de moléculas de β -glucosa, es pues un homopolisacárido. La celulosa es la biomolécula orgánica más abundante ya que forma la mayor parte de la biomasa terrestre. Su fórmula empírica es: $(C_6H_{10}O_5)_n$, pudiendo llegar a valores de n , de hasta 200.
- **Hemicelulosa (20-30) %:** La hemicelulosa es un heteropolisacárido (polisacárido compuesto por más de un tipo de monómero).
- **Lignina (20-30) %:** La lignina es un polímero presente en las paredes celulares de organismos del reino Plantae. La palabra lignina proviene del término latino lignum, que significa madera, así, a las plantas que contienen gran cantidad de lignina se las denomina leñosas. La lignina se encarga de engrosar el tallo. Fórmulas: $C_9H_{10}O_2$, $C_{10}H_{12}O_3$, $C_{11}H_{14}O_4$.

La madera para el carbón activo será obtenida en las extensiones boscosas del norte de España, legalizadas para este propósito, por medio de la tala de Pinos, normalmente la principal madera utilizada será el pino negro situado en la zona pirenaica, con unas propiedades físicas [34]:

- Sólido.
- pH = 4,336.
- Insoluble en agua.
- ρ (densidad) = $0,570 \text{ g/cm}^3$ ($570,0 \text{ kg/m}^3$).
- k (conductividad térmica) = $0,112 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- C_p (calor específico) a la temperatura de proceso, = $0,350 \text{ kcal/kg}\cdot\text{K}$ ($1.459 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$).

Agente Activante H_3PO_4

De fórmula química H_3PO_4 , ácido que constituye la fuente de compuestos de importancia industrial llamados fosfatos. A temperatura ambiente, el ácido fosfórico es una sustancia cristalina con una densidad relativa de 1,83 (estado sólido). Normalmente, el ácido fosfórico se almacena y distribuye en disolución, con concentraciones de al 75% y al 85% [35].

El que se utiliza en este proceso es el Ácido fosfórico al 85%, y tiene las siguientes propiedades químicas:

- Líquido.
- Incoloro.
- Inodoro.
- pH = 1.
- Muy soluble en agua y alcohol.
- Densidad relativa del vapor (referencia el aire) = 3,4.
- Punto de fusión = $21,1^\circ\text{C}$.
- Punto de ebullición = 158°C .
- Presión de vapor = $2,1 - 5,7 \text{ mm Hg}$ ($2,8 \cdot 10^{-3} - 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$).
- ρ (densidad) = $1,68 \text{ g/cm}^3$ (1.680 kg/m^3).
- $\rho_{90^\circ\text{C}}$ (densidad) = $1,35 \text{ g/cm}^3$ (1.350 kg/m^3).
- Peso molecular (Pm) = 98 g/mol .
- μ (viscosidad) = 46 cp ($0,046 \text{ Dp}$).

- C_p (calor específico) a la temperatura de proceso = 0,312 kcal/kg·K (1.298 J/kg·K).

Además, el ácido fosfórico no se quema, reacciona con los metales para formar H_2 altamente inflamable. Durante un incendio se puede producir óxidos de fósforo tóxicos e irritantes. Es estable al aire, a la humedad y al calor.

Para el transporte y su manipulación se exige las siguientes medidas de seguridad:

- **Corrosivo:** Obligatorio el uso de guantes y gafas de seguridad, de material plástico (PVC). También los bidones en el que es transportado son de material de PVC.
- **Ácido fuerte:** Se vierte el ácido al agua, para evitar salpicaduras de ácido y cambios bruscos en él. El almacenamiento en la empresa puede darse o bien en los envases originales en los que vienen (bidones de PVC), o bien, en silos especiales de acero inoxidable, unidos a la red y desde los cuales se introduce en el proceso.

6.3. Descripción de la planta

El carbón activo que se desea producir es del tipo, carbón activo granular (CAG). La materia prima de la que se parte es la madera, provienen de las zonas boscosas preparadas para la tala de árboles en el norte de España. El carbón activo será producido por el proceso de activación química usando como agente activante el H_3PO_4 .

El proceso está calculado para hacer dos coladas diarias (dos ciclos completos al día), por lo tanto el tiempo de cada ciclo es de 12 horas. Este proceso tiene un rendimiento, obtenido experimentalmente, y conocido por bibliografía de aproximadamente un 50%. En concreto con los datos utilizados y obtenidos da un 55,38%. El proceso en planta es continuo y no para, con lo que se necesitan grupos de trabajo para trabajar mañana, tarde y noche y también en horario de fin de semana, por consiguiente se trabajará con 5 turnos.

A continuación se muestra, de manera esquemática, el proceso total de producción de carbón activo con las condiciones de trabajo, en el siguiente diagrama de bloques (figura 46):

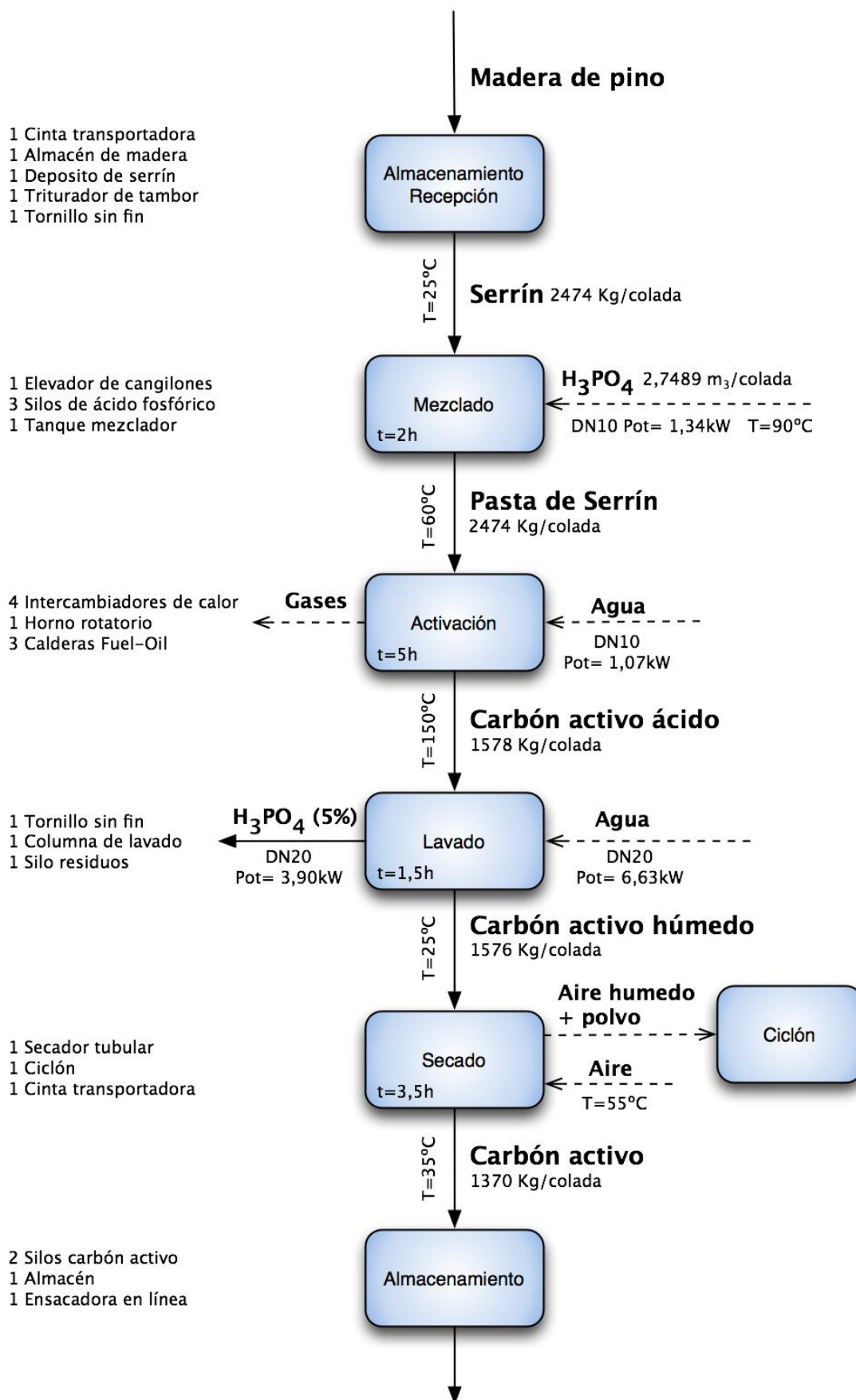


FIG. 46. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO.

La fábrica consta de tres niveles:

Planta calle: En esta planta se obtienen los productos principales del proceso. La madera obtenida por transporte, se almacena, a la espera de pasar por la trituradora para ser transformada en serrín. Después el serrín es llevado a un depósito de almacenaje, para su uso posterior.

Lo mismo pasa con el ácido fosfórico. Viene en pallets divididos por bidones, y como va a ser introducido en el proceso por una vía específica, se necesitan silos para su uso.

También se encuentra en esta planta la zona de ensacado y almacenaje del producto final. Consta de 2 zonas:

La primera zona es la de los depósitos de almacenamiento de producto final. El carbón activo llega a ellos por medios de una red de tuberías específica, solo para el producto que sale del secador. Con forma cilíndrica, son de acero inoxidable y es donde se realiza la entrega de producto a granel, viniendo camiones cisterna para su llenado una vez a la semana. También desde estos depósitos, se llenan unos silos móviles movidos por grúas que se llevan a la segunda zona de ensacado que existe en la fábrica.

La segunda zona es un almacén cubierto donde se haya la ensacadora para el producto vendido empaquetado. Estas incluyen unas guías para los sacos los cuales acaban apilados en palets y situados en la zona de almacenaje del almacén listos para su venta.

Debajo de toda la planta se encuentra la sala de control, desde donde se realizan los controles rutinarios del proceso, para que el margen de error sea mínimo y punto de reunión del turno de trabajo.

Por último en esta planta se encuentran 2 depósitos más. Uno de nitrógeno necesario para realiza las operaciones

de mezclado y activación con atmosfera inerte. Depósito que es reabastecido cíclicamente. Y otro de almacenamiento de ácido diluido, proveniente de la columna de lavado, que es vaciado por el suministrador para su reconcentración y así poderlo volver a usar.

Planta 1ª: Planta principal en la cual se encuentra el horno rotatorio, y por lo tanto, donde se produce la activación del carbón. Está en la planta intermedia ya que, el serrín es llevado por medio de un elevador de cangilones al tanque mezclador donde es impregnado. De ahí cae a través de una tubería que conexiona el tanque mezclador situado en la planta superior con el horno rotatorio situado en la planta 1ª. Esta tubería es cerrada para que la mezcla no reaccione y se contamine con nada, ya que en estas condiciones el fosfórico podría reaccionar con el aire, por eso este proceso se realiza con atmosfera inerte. La tubería conecta con la boca del horno de manera hermética y se desliza por gravedad hasta su interior. Como el horno necesita un ángulo de inclinación para el traslado de material por él, en esta posición se asegura de que el producto final llegue a planta calle, para luego ser transportado a la torre de extracción a través de un tornillo sin fin (planta 2ª).

En esta planta se encuentra el secador, como en el caso del horno, desde la columna de extracción, se introduce el carbón húmedo y se introduce en el secador. Aquí el producto no corre peligro de ser contaminado, ya que a la temperatura que se encuentra y en las condiciones finales del proceso, el carbón activo es estable. Aun así se lleva a través de tubería cerrada para minimizar pérdidas.

Como se ha dicho anteriormente desde el secador y por una red de tuberías específica, se lleva el carbón activo a los depósitos de almacenamiento finales, situados en planta calle.

Planta 2ª: En la planta segunda se encuentra el tanque mezclador, y por tanto, el inicio del proceso. Esto quiere decir, que el producto va como una especie de montaña rusa de arriba hacia abajo y viceversa, ya que como se ha citado anteriormente, desde el mezclador, cae por gravedad al horno situado en planta 1ª.

El serrín va al tanque mezclador por medio de una red tuberías desde el silo de almacenamiento, situado en planta calle, hasta el tanque mezclador (2ª planta).

También en esta planta se encuentra la torre de extracción, que hace el mismo recorrido para llevar el proceso hasta el secador.

En esta planta existe más espacio para control de planta, que en las otras, que existe más manipulación del proceso. Por esta razón, se sitúan la mayoría de controles y controladores de condiciones (presión, temperatura, pH, acidez,...) de las distintas redes de la planta (red de tuberías del agua, del ácido fosfórico, de nitrógeno, de producto principal,...), llevando todos estos datos a un programa informático, desde el cual se puede controlar todos los sistemas automatizados en caso de variaciones bruscas, como el aumento de presión en una bomba de alimentación debido a que dicha bomba se ha cebado, así como encontrar rápidamente problemas en el proceso, a los cuales haya que ir a resolverlos manualmente.

La estructura de la planta es rectangular teniendo una anchura de 10 m y llegando a una altura de 30 m, haciendo así una superficie por planta de 300 m². La planta consta de tres pisos, como se ha dicho, siendo de superficie exacta cada planta, haciendo así una superficie de planta de 900 m². La altura que hay de suelo a suelo, es decir, por planta es de 5 metros y haciendo un total de altura, desde la planta calle hasta el techo de la 2ª planta de 15 m.

Sabiendo la distribución de la planta, comienza la explicación del proceso.

6.3.1. Almacenamiento de materias primas y reactivos

Almacenamiento de la madera

Los troncos de madera llegan a través de camiones todas las semanas. Al día el proceso consume alrededor de 5,00 toneladas siendo necesarias 35,0 toneladas aproximadamente a la semana. La madera desde los camiones se lleva a un almacén antes de ser introducida a las trituradoras. En el almacén siempre existe una reserva de madera igual a la cantidad de madera que consumiría el proceso en una semana, es decir, unas 35 toneladas aproximadamente. Cubriendo así la posibilidad de que por causas externas a la empresa, como la meteorología, hubiese una falta de producto por transporte. Quiere decir también que se gastan 35,0 toneladas a la semana y esa es la cantidad necesaria que debe ser suministrada semanalmente desde la fuente de materia prima.

El serrín obtenido en las trituradoras es llevado a través de una cinta transportadora plana, a un depósito de almacenamiento, que a la vez sirve de distribuidor para el inicio del proceso por medio de un elevado de cangilones de escamas, véase figura 46.

Este depósito es de la marca *wolfsystem*, cilíndrico y hecho con hormigón como material. Tiene una capacidad máxima de 1.000 m³ [36].

Los silos de esta marca siempre están a la altura de la normativa vigente (protección contra incendios, prevención de explosiones). Vienen también con las escaleras, podios,

barandillas e instalaciones contra incendios requeridas para el movimiento a su través.



FIG. 47. DEPÓSITO DE SERRÍN.

Almacenamiento de H_3PO_4

El suministrador envía packs de 50 bidones, de 35 kg cada uno, como se ha dicho por lo tanto todo bidón que no se utilice por que los silos de H_3PO_4 están llenos, se llevan a una nave para almacenarlos, evitando la exposición a las personas y a las altas temperaturas, así se mejora la seguridad.

El ácido fosfórico que se utiliza en el proceso es llevado a dos silos distribuidores. El material de estos silos es

de acero inoxidable para evitar la contaminación del reactivo. El volumen de fosfórico por colada a la temperatura de proceso es 2,749 m³ por lo que se utilizan silos con un volumen de capacidad de 3 m³ cada uno. Se utiliza un silo por colada, aprovechando a llenar el que queda vacío manualmente. Existe un tercer silo reserva conectado a la red por si acaso la distribución de uno de los silos se viese averiada. Estos silos están en planta calle.

En las figuras 48 y 49, se puede ver tanto el embalaje del ácido fosfórico para su transporte, como el silo donde se almacena en industria.



FIG. 48. BIDONES DE ÁCIDO FOSFÓRICO.

Y a continuación un ejemplo de tanques de acero inoxidable.



FIG. 49. DEPÓSITOS DE ACERO INOXIDABLE.

El ácido fosfórico es un líquido viscoso a temperatura ambiente por lo tanto sus condiciones en recepción son:

- Temperatura = 35 °C.
- Presión = 1 atm.
- Viscosidad (a 35 °C) = 40 cp. = 4 Dp.
- Densidad (a 35 °C) = 1.680 kg/m³.

Las características de los silos de almacenamiento son:

- Marca: Solids.
- Material: Acero inoxidable.
- Temperatura de trabajo (°C): 90,0.
- Altura (m): 3,82.
- Diámetro (m): 1,00.
- V_{capacidad} (m³) = 3,00.
- V_{utilizado} (m³) = 2,75.
- % llenado (%): 91,6.

Los silos son descargados por la parte inferior por medio de una bomba centrífuga circuladora cada uno, con una potencia de:

- Depósito 1: 1,3405 kW.
- Depósito 2: 1,4177 kW.
- Depósito 3: 1,3233 kW.

Y las siguientes características:

- Marca: Grundfos.
- Modelo: UPS serie 200.
- Material: Recubrimiento de hierro.
- Caudal máximo (m³/h): 70.
- Altura máxima (m): 18.
- Temperatura del líquido (°C): -10 a 120.
- Presión máxima del sistema (bar): 10.

6.3.2. Trituración: Obtención del serrín

Los troncos se conducen al almacén para ser ordenados y preparados para ser llevados al triturador.

Para llegar hasta él, los troncos son llevados por una cinta transportadora plana. El triturador está en el mismo almacén, situada en planta calle. Se obtiene de manera continua el serrín que es llevado al tanque de almacenamiento, para ser utilizados en el proceso por medio de un elevador de cangilones.

Características de la cinta:

- Marca: Sinerges.
- Modelo: STB90E.
- Longitud (m): 15.
- Ancho (m): 0,5.
- Área (m²): 7,5.
- Altura (m): 1,5.
- Ángulo de inclinación (°): 0.
- velocidad de la cinta (m/s): 2.

La máquina es, una trituradora de tambor, en el cual se encuentran dos dientes que facilitan el corte del tronco en la entrada. El diámetro de entrada del tronco varía según fuera el tamaño del árbol que entra en ese momento, y son reducidos a virutas de diámetros entre 1-3 cm.

Las características de la trituradora son:

- Marca: Anyang Gemco Energy Machinery Co.
- Modelo: BX216.
- Material: Acero.
- Diámetro rotor (mm): 650.
- Boca de alimentación (mm): 300x480.
- Velocidad de rotor (rpm): 590.

- Velocidad de alimentación (m/min): 38.
- Longitud de astillas (mm): 35.
- Capacidad (m^3/h): 12.
- Potencia de motor principal de accionamiento (kW): 55.
- Potencia de motor de rodillo de alimentación (kW): 12.
- Peso (t): 4,07.

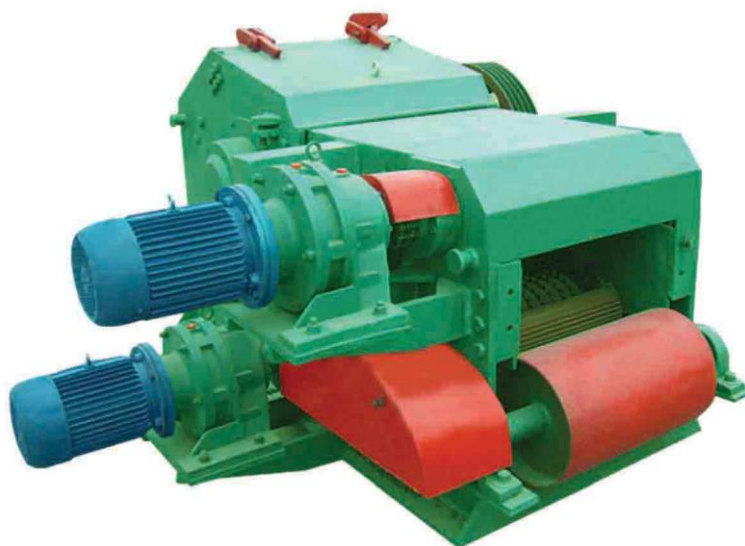


FIG. 50. TRITURADOR DE TAMBOR.

6.3.3. Impregnación: Tanque mezclador

El serrín es transportado desde el depósito de almacenamiento hasta la segunda planta por medio de un elevador de cangilones con tronco de escamas, de esta manera se tiene una inclinación respecto al eje de ordenadas y el serrín cae por gravedad al mezclador sin problemas de obstáculos para los cangilones y sin desprendimiento de material. Este proceso se detiene una vez es cargado completamente el mezclador. Y no se vuelve a usar hasta que no esté el mezclador completamente vacío y comience el siguiente ciclo de producción. El elevador de cangilones tarda en echar 2.474 kg de serrín (cantidad necesaria por colada) 10 minutos, por lo que va a un ritmo de 247,4 kg/min:

- Marca: Aritema.
- Modelo: EC-200.
- Material: Acero.
- Capacidad (m^3/h): 30.
- Ancho del cangilón (mm): 220.
- Ancho de la banda (mm): 300.
- Número de cangilones: 20.
- Número de cangilones/min: 10.
- Volumen del cangilón (m^3): 0,044 .
- Peso de madera por cangilón (kg/cangilón): 24,74.
- Altura elevador (m): 12,5 m.
- Longitud de la diagonal (m): 23,6 m.

A la vez que el serrín es depositado en el tanque mezclador, el ácido fosfórico entra, desde los silos de almacenamiento en planta baja, por el circuito de tuberías de acero inoxidable para ácido fosfórico. Las características de la bomba son:

- Marca: Grundfos.
- Modelo: UPS serie 200.
- Material: Recubrimiento de hierro.
- Caudal máximo (m^3/h): 70.
- Altura máxima (m): 18.
- Temperatura del líquido ($^{\circ}\text{C}$): -10 a 120.
- Presión máxima del sistema (bar): 10.



FIG. 51. BOMBA PARA EL SISTEMA DE H_3PO_4 Y LAVADO.

El cilindro distribuidor del tanque de mezclado comienza a moverse mientras es llenado por el precursor y el agente activante, para que el serrín se distribuya bien por el tanque.

Una vez es introducido todo el material, el tanque es cerrado y se introduce $N_{2(gas)}$ para trabajar con atmósfera inerte. El ácido fosfórico entra por la parte superior del mezclador y es introducido en modo pulverizador de manera que llegue a todas las partes del tanque.

El proceso dura un tiempo de 1 hora y 45 minutos, desde que entra el primer cangilón de serrín, hasta que se para el mezclado. El tiempo de vaciado es aparte siendo unos 15 minutos cuando se acaba totalmente de echar la corriente de producto a la boca del horno. Esto hace un tiempo total de proceso de 2 horas.

Se forma una charca en el tanque que se mantiene durante todo el tiempo de residencia, asegurando el contacto de toda la madera con el activante químico.

Las características del tanque mezclador son:

- Marca: Bachiller.
- Modelo: Turbomix (MHT).
- Material: Acero inoxidable.
- Disposición espacial: Colocación horizontal.
- Volumen del tanque (m^3): 12,0.
- Volumen de carga máximo de seguridad (m^3): 8,0.
- Longitud (m): 3,82 m.
- Diámetro (m): 2,00 m.
- Tiempo de mezclado (h): 1-5.
- Potencia del removedor (KW): 7,5.
- Peso (t): 7,5.

El volumen ocupado entre serrín y ácido contando la cantidad que ha entrado de cada uno y su proporción, y

haciendo una medida de volumen, contando que el ácido “llena” los huecos que deja el serrín, sale un volumen de mezcla igual a $6,68 \text{ m}^3$. Este es un 56% del volumen máximo del tanque mezclador, aproximadamente. Con esto se consigue que el contacto entre precursor y agente activante sea lo más homogéneo posible.

Cuando pasa la hora y cuarenta y cinco minutos de tratamiento en el mezclador este abre una compuerta situada en el centro de su suelo y que está conectada directamente al horno situado en la primera planta, de manera que el material cae por gravedad y por una tubería aislada completamente de la atmósfera, protegiendo la mezcla en su traslado.

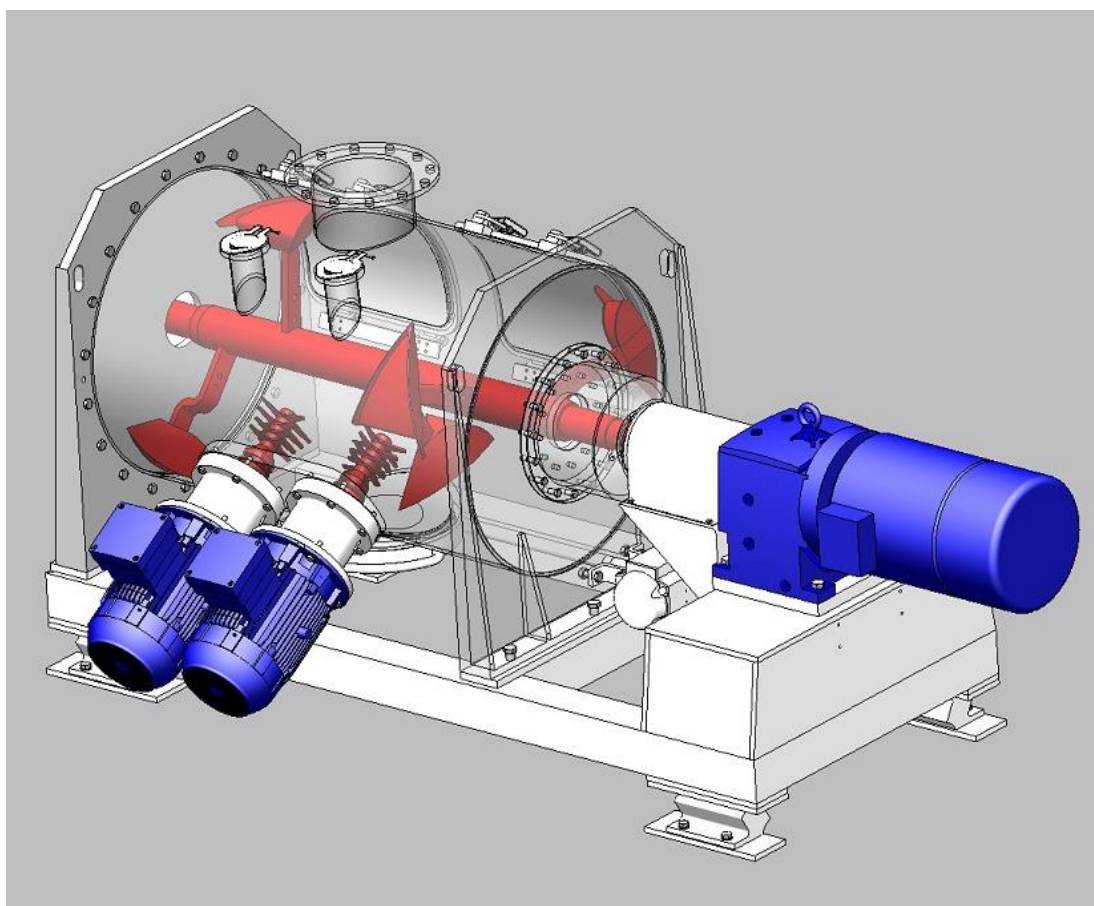


FIG. 52. TANQUE MEZCLADOR.

6.3.4. Activación del carbón.

No hay ninguna regla válida para determinar la pendiente de los hornos rotatorios. Su valor oscila entre el 2-6 %. Aunque la mayoría de los hornos están instalados con pendientes entre el 2-4 % con relación a la horizontal. Cuanto menor sea la pendiente se requerirá velocidades más altas de esta manera, crece el movimiento de las partículas de carbón favoreciendo el intercambio de calor. También, si la inclinación es pequeña se alcanza un grado de llenado más alto. Los grados de llenado fluctúan entre los límites 5-17 %. En la explotación práctica del horno, el grado de llenado no debe pasar del 13 %, pues valores superiores empeoran la transmisión de calor.

Mientras que los diámetros de los hornos eran de 0-3 m, se hablaba de modo general del número de vueltas del horno. Sin embargo, actualmente por haber hornos de 6 o más metros de diámetro, la velocidad del movimiento rotatorio del horno se hace expresa por la velocidad tangencial o periférica en lugar de hacerlo por el número de vueltas. Para la explotación económica del horno se utilizan las velocidades periféricas de 38-40 cm/s.

La materia atacada por el ácido llega al horno. El horno tiene un volumen total de $51,4 \text{ m}^3$, como se ha dicho en la descripción del horno, el volumen práctico es el 13% del total, esto hace un total de $6,81 \text{ m}^3$ prácticos, y con el cual ha sido calculado todo el resto del proceso. Con este volumen ha sido calculado el tamaño en kilogramos de cada colada, y por tanto el resto de programas dentro del proceso. Se puede decir que este horno trabaja en continuo, aunque cada colada tarda 5 horas en salir del horno, y hasta que esta no sale no entra la siguiente producción.

El horno cuenta con 4 fases:

- 1. Fase de secado y precarbonización:** El material llega impregnado de ácido, pero además trae consigo el ácido que no ha sido absorbido, en esta primera fase se seca el material y después se inicia la fase de eliminación de componentes de la madera (hidrógeno, oxígeno). Esta fase ocupa un 25% del horno (no en volumen si no en longitud total del horno), y hace un gradiente de temperatura de 100 °C, yendo desde los 100 °C hasta los 200 °C. se necesitara un tiempo de 30 minutos
- 2. Carbonización:** Contigua a la fase de precarbonización, El tiempo de residencia en el que la materia carbonosa de la primera fase se transforma ya en carbón, en esta fase es de un total de 1 hora y 40 minutos, pasando de la temperatura de 200 °C a 400 °C.
- 3. Activación:** Parte fundamental del proceso, ocupa la mayor parte del horno (33%) y aquí tiene lugar la transformación total del carbón en carbón activo, gracias entre otras cosas a la acción del ácido fosfórico y a la eliminación correspondiente de los otros compuestos. Hay que cuidar mucho la temperatura del horno para evitar la combustión de la materia carbonosa. La temperatura fijada experimentalmente, consigue el tamaño y número de poro deseado para el tipo de activación y material utilizado en el tiempo de 2 horas y 30 minutos pasando desde los 400 °C de los que provenía de la fase de carbonización hasta los 500 °C.
- 4. Enfriamiento:** Última zona del horno. De aquí sale al exterior, ahora ya no se protege de la atmosfera, ya que a temperaturas bajas el producto es ya estable. Tarda unos 20 minutos en atravesar esta zona y cuando lo hace y el horno se vuelve a encontrar vacío completamente, se puede empezar con la nueva colada.

En esta fase del horno se utiliza una bomba para el paso de agua, para el enfriamiento del producto. La bomba es la siguiente:

- Marca: Grundfos.
- Modelo: UPS serie 200.
- Material: Recubrimiento de hierro.
- Caudal máximo (m^3/h): 70.
- Altura máxima (m): 18.
- Temperatura del líquido ($^{\circ}\text{C}$): -10 a 120.
- Presión máxima del sistema (bar): 10.

El horno siempre está en funcionamiento y nunca está vacío. De esta manera se evita perdidas en gasto de energía, y calentamiento de las paredes refractarias del horno sin material, sin contar la posible rotación del horno sin producto.

El tiempo total en el horno es de 5 horas desde que entra hasta que sale completamente.

El horno elegido (figura 53) es de la marca zhongke. Su material, específico para este proceso, es acero inoxidable y tiene un calentador de camisas de vapor, alimentadas por calderas de Fuel-oil. El tamaño elegido se debe al cálculo previo de las necesidades y objetivos del proceso.

La ficha técnica del horno indica que:

- Marca: Zhongke.
- Modelo: Rk50.
- Material: Acero inoxidable.
- Disposición espacial: Colocación horizontal.
- Potencia (KW): 18,5.
- Voltaje (V): 220 – 460.
- Ángulo de inclinación (%): 4.
- Peso (t): 15,2.
- Longitud (m): 10.

- Diámetro exterior (m): 3,10.
- Diámetro interior (m): 2,60.
- Volumen (m^3): 51,4.
- Velocidad de giro (rpm): 6,3.
- Zonas de gradiente posibles: de 3 a 5.
- Certificación: ISO y CE.



FIG. 53. HORNO ROTATORIO.

6.3.5. Lavado del carbón activo

Desde la salida del horno y por medio de tornillo sin fin, ya que el carbón ahora es estable y no se tiene que proteger de la atmósfera, se lleva a la columna de lavado para realizar una extracción del ácido fosfórico. Las características del tornillo sin fin son:

- Marca: Nuteco.
- Modelo: TF-270.
- Material: Acero inoxidable.
- Longitud (m): 12.
- Ancho (mm): 500.
- Área (m²): 6.
- Alto (mm): 500.
- Diámetro tornillo (mm): 490.
- Ángulo de inclinación (°): 60.
- velocidad del tornillo (rpm): 29.
- Disposición espacial: Colocación diagonal.

Este paso trata de pasarle al producto sólido agua a través, consiguiendo así que se diluya el ácido fosfórico en ella. De esta manera se limpia el carbón del material activante, consiguiendo su purificación completa.

La disolución de ácido fosfórico y agua resultante es enviada al depósito de almacenamiento de disolución de ácido fosfórico al 5%. este depósito sirve para que el suministrador del ácido, venga cíclicamente con camiones cisternas a la empresa, para llevárselo y así poderlo regenerar, con una reconcentración, de manera que se pueda volver a utilizar. De esta manera, el ácido que se compra sale más barato, gracias al ácido que le devolvemos y de esta manera, este proceso se hace altamente rentable.

Se busca la eliminación absoluta del ácido del material carbonoso. Como el ácido fosfórico es soluble tanto en agua como en alcohol, y se tiene la posibilidad de la obtención de agua de la red de aguas que existe en el polígono industrial, la extracción será llevada a cabo con agua.

Con unas bombas centrífuga circuladora con control electrónico, para que funcione o pare según el pH controlado a la salida de la torre por donde va la disolución de ácido diluido (figura 54) de la marca grundfos, se lleva agua hasta la columnas y se vacían. esta bomba tiene estas características:

- Marca: Grundfos.
- Modelo: MAGNA, serie 2000.
- Material: Recubrimiento de hierro.
- Caudal máximo (m^3/h): 90.
- Altura máxima (m): 12.
- Temperatura del líquido ($^{\circ}\text{C}$): 15 a 110.
- Presión máxima del sistema (bar): 10.



FIG. 54. BOMBA PARA EL SISTEMA DE LAVADO.

El volumen de agua está calculado por el volumen de columna, contando con que el carbón activo y el ácido que hay por colada. El número de fases de extracción, está

controlado con un pH metro, siendo el número de coladas necesarias 4.

El extractor está unido al secador de manera exacta a como lo está el tanque mezclador con el horno, con la diferencia de que ahora al carbón no le ocurre nada en contacto con la atmósfera. El secado es la última operación del proceso.

Las características de la torre de lavado son:

- Marca: Fiplas.
- Modelo: TL100.
- Material: Cerámico recubierto de resina con resistencia química “VINILESTER”.
- Disposición espacial: Vertical.
- Peso (t): 5,7.
- Longitud (m): 6,0.
- Diámetro (m): 1,46.
- Volumen (m³): 10,0.

Torre de lavado condiciones:

Se debe utilizar la temperatura máxima adecuada durante el mezclado, puesto que la mayor viscosidad resultante del líquido aumenta tanto la rapidez de difusión del soluto como la facilidad con la cual pueden moverse las partículas de adsorbentes a través del líquido. Por lo común, la adsorción del equilibrio disminuye ligeramente a mayores temperaturas, pero la disminución está más que compensada por la mayor rapidez de aproximación del equilibrio.

En este caso no es necesario introducir el agua a ninguna temperatura especial ya que su viscosidad es pequeña, y como a temperatura ambiente el ácido es muy soluble en agua, podemos trabajar en condiciones normales.

el ácido con el carbón activo entran calientes provenientes del horno, pero enfriándose gracias a la temperatura atmosférica mientras son desplazados por el tornillos sin fin, hasta la columna de lavado.



FIG. 55. TORRE DE LAVADO PARA EL CARBÓN ACTIVO.

El tiempo en esta fase del proceso es 1 hora y media, contando la entrada y la salida del carbón activo. Los lavados cuentan con una fase de llenado y otra de vaciado, cada una de 5 minutos, por cuatro fases de lavado, hacen un total de 40 minutos y el llenado y vaciado de producto de la torre cuestan 25 minutos cada uno.

6.3.6. Secado

El secado del carbón se realiza con aire atmosférico y en un secador rotatorio a contracorriente.

El proceso tarda un tiempo de 3 horas y 30 minutos, contando la entrada y la salida del producto.

La humedad con la que entra en el secador tiene un valor máximo, ya que está recién salido de la torre de lavado. La humedad de entrada es eliminada en el secador para obtener el carbón activo como producto listo a su salida listo para el almacenamiento.

Para que el porcentaje de humedad del carbón en cisterna o ensacado sea ideal tiene que tener un valor inferior al 1%. Este análisis se realiza en laboratorio, cogiendo muestra del carbón activo en el depósito de almacenamiento.

El aire es introducido a temperatura de 55 °C en contracorriente arrastra consigo el resto de polvo y cenizas que lleva consigo el carbón activo, teniendo que ser limpiada la mezcla en un ciclón.

Las características del secador son:

- Marca: Shenzhen Yuhan Electro-Mechanic Co.
- Modelo: rp1012.
- Material: Acero galvanizado.
- Disposición espacial: Horizontal.
- Pendiente (%): 5.
- Peso (t): 13,24.
- Longitud (m): 12,0.
- Diámetro (mm): 1000,0.
- Volumen (m³): 9,42.
- Volumen utilizado (m³): 1,00.

Se realiza con un porcentaje de volumen ocupado igual a 10,6% respecto al volumen del horno. De esta manera el contacto del producto con el aire es completo, y se evita que alguna porción del carbón activo quede sin secarse.

El diseño con el ciclón sería así:

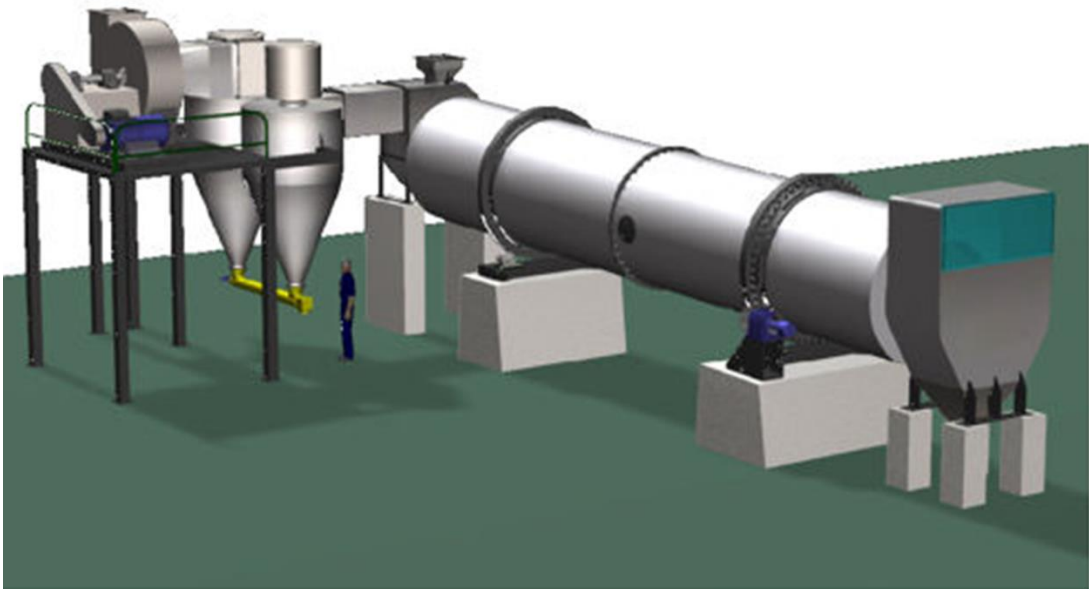


FIG. 56. DISEÑO DEL SECADOR MÁS EL CICLÓN.

6.3.7. Almacenamiento del carbón activo

El carbón activo ya secado, es dirigido a los tanques de almacenamiento mediante transportes articulados o tuberías.

Se almacena con el objetivo de disponer de él para distintos compradores, ya que dependiendo del comprador el carbón activo es suministrado o bien en sacos o bien a granel suministrado en camiones cisternas, los cuales, son llenados directamente desde el depósito de almacenamiento. Para este almacenamiento, se emplea un depósito:

- Marca: WOLF.
- Material: Hormigón armado.
- Altura (m): 15,0.
- Diámetro (m): 6,0.
- Volumen (m^3) = 424,0.
- Disposición espacial: Vertical.

El carbón activo como producto final, tiene las siguientes características:

- Área específica total (m^2/g): 1,200.
- Tamaño de partículas (g/cm^3): 1,18 – 2,36.
- Densidad de la partícula (kg/m^3): 800 -850.
- Densidad real (kg/m^3): 2.000 – 2.200.
- Densidad aparente en lecho (kg/m^3): 450 – 480.
- Calor específico ($J/kg^\circ C$): 833,3 – 1.041,7.
- Contenido de ceniza (%): 2,0 – 4,0.

6.3.8. Ensacado y carga del carbón activo

Desde el silo de almacenamiento, se lleva el carbón activo a la zona de ensacado mediante transportadores articulados. El envasado de carbón activo se efectúa con unas ensacadoras automáticas, para sacos de boca abierta para llenado de carbón, como el de la figura 57.

Estas ensacadoras tienen las siguientes características:

- Marca: PAYPER.
- Modelo: CSA-70/75.

Tiene una capacidad de producción de hasta 500 sacos de 25 kg a la hora.

Los sacos de carbón activo son almacenados en “palets” mediante una paletizadora automática y embalados. Estos palets son colocados una encima de la otra en una nave de

almacenaje. Estas cargas son sacadas mediante carretillas elevadoras (toros mecánicos) y cargadas en vehículos para su venta.



FIG. 57. ENSACADOR ROTATIVO.

6.4. Presupuesto

En la tabla 11, se tiene un presupuesto acorde a la cantidad necesaria para crear una industria como la de este diseño. Quiere decir, que no es un presupuesto de rentabilidades si no de costo de creación inicial.

TABLA 11. PRESUPUESTOS DE LA MAQUINARIA DE LA PLANTA.

FASE	PIEZAS		PRECIO (€)	
	Nº	Nombre	Unitario	Total
<i>Trituración</i>	1	Triturador de tambor	12.700,0	12.700,0
<i>Mezclado</i>	1	Tanque de Mezclado:	95.000,0	95.000,0
	1	Cuerpo cilíndrico	70.000,0	70.000,0
	1	Sistema motor	20.000,0	20.000,0
	2	Apoyos rectangulares	2.500,0	5.000,0
<i>Activación</i>	1	Horno:	892.000,0	892.000,0
	1	Cuerpo cilíndrico	280.000,0	280.000,0
	1	Tapa fuente de aliment.	30.000,0	30.000,0
	1	Tapa receptor	39.000,0	39.000,0
	8	Apoyos cónicos	21.375,0	171.000,0
	1	Sistema Motor	142.000,0	142.000,0
	3	Calderas para combustible	76.666,7	230.000,0
<i>Lavado</i>	1	Torre de lavado:	45.000,0	45.000,0
	1	Cuerpo	4.000,0	4.000,0
	1	Cilindro interno	15.000,0	15.000,0
	1	Sistema motor	2.500,0	2.500,0
	2	Soportes	12.000,0	24.000,0

		cilíndricos, con apoyos cónicos		
<i>Secado</i>	1	Secador:	69.000,0	69.000,0
	1	Coraza	25.000,0	25.000,0
	1	Receptor	1.000,0	1.000,0
	1	Salida	500,0	500,0
	2	Inyectores	4.000,0	8.000,0
	4	Apoyos rectangulares	7.000,0	28.000,0
	1	Sistema motor	6.500,0	6.500,0
<i>Transportes:</i>	1	Cinta transportadora plana	3.500,0	3.500,0
	1	Tornillo sin fin (almacén-depósito de serrín)	4.200,0	4.200,0
	1	Elevador de cangilones de escamas	5.800,0	5.800,0
	1	Tornillo sin fin (horno-lavado)	5.000,0	5.000,0
<i>Bombas:</i>	8	Bombas centrifugas-circuladoras, UPS serie 200 (GRUNDFOS)	420,0	3.360,0
	4	Bombas centrífugas-circuladoras, MAGNA serie 2000 (GRUNDFOS). Control electrónico	580,0	2.320,0
<i>Almacenamiento: Materias primas y</i>	2	Almacenes	3.500,0	7.000,0
	1	Depósito de serrín	10.000,0	10.000,0
	3	Silos de H_3PO_4	750,0	2.250,0

<i>otros reactivos</i>	2	Depósitos de almacenamient o de ácido diluido	4.000,0	8.000,0
			Σ TOTAL (€)	1.165.130, 0

7. CÁLCULOS DEL PROCESO

7.1. Elección del proceso

El proceso elegido para la activación del carbón activo será el método químico a través del ácido fosfórico y utilizando madera como materia prima.

La elección de este precursor es sencillamente por dos razones:

- 1.- La depuración de aguas consume aproximadamente el 80% del carbón activo que se produce. Para ello es necesario un tamaño y número de poros determinado (véase tabla 3) que se obtiene utilizando madera como materia prima.
- 2.- De entre los precursores normalmente utilizados que se usan para esta obtención, en España el más abundante es la madera, en concreto madera de pino.

De ahí que la opción de construir una empresa nacional sea una opción interesante.

El proceso de activación para madera puede ser químico o térmico (véase tabla 4), pero el proceso químico es más rentable. El proceso químico de activación, además de ser más económico, es más eficiente y rápido, por este orden.

Por otro lado el ácido fosfórico es el más fácil de separar del carbón activo y es el agente activante que entra en menor proporción junto al precursor, de ahí que el proceso no se encarezca demasiado.

El rendimiento se conoce a través del ensayo en planta piloto y por bibliografía [37], se sabe que es el más alto conseguido por activación química de entre todos los procesos que existen.

En este caso alcanza un porcentaje en base a la masa de carbón activo recogido al final, de 55,38% sobre el serrín introducido al principio del proceso.

7.2. Balances de materia y de energía

Este proceso permite hacer al día dos ciclos (o coladas), luego se debe calcular la cantidad en base a 12 horas para sacar las cantidades por colada que se necesita en todo el proceso.

Se calcula la producción horaria teniendo en cuenta el objetivo de producción anual de la planta que es de **1.000 t/año**. De esta forma, la producción diaria será:

$$1000 \text{ t/año} \times 1 \text{ año}/365 \text{ días} = 2,740 \text{ t/día}$$

Y por lo tanto al saber que se hacen dos coladas por día, el objetivo por ciclo será de:

$$2,740 \text{ t/día} \times 1 \text{ día}/2 \text{ coladas} = 1,370 \text{ t/colada}$$

A partir de este dato, el cual, es el que tiene que conseguirse, contando las perdidas, en los tanques o depósitos de almacenamiento al final de cada periodo de 12 horas, se empieza el cálculo de los materiales a la entrada y salida de cada uno de ellos. Los balances del serrín y del ácido fosfórico son con valores de masa. Siendo el rendimiento total calculado en porcentaje de masa final obtenida por masa inicial introducida.

Yendo en dirección contraria al proceso de producción se obtendrán las cantidades exactas necesarias. Los valores de pérdida se han conseguido por medio de la bibliografía [38].

Se hacen los cálculos en base a un ciclo completo para que coincidan con las unidades expuestas en el diagrama de bloques.

La ecuación para los balances es la siguiente:

$$E + G = S + D + A \qquad \text{Ecuación 7.}$$

Siendo:

- E: Entrada de material. Cantidad de material por ciclo o tiempo que entra en cada etapa del proceso.
- G: Producto que se genera. En caso de existir reacciones químicas, lo que se forma.
- S: Salida de material. Cantidad de material por ciclo o tiempo que sale en cada etapa del proceso.
- D: Desaparecido. El material que desaparece. Bien por pérdidas, bien por formación de compuestos no válidos que se eliminan, o por el rendimiento de una reacción química.
- A: Acumulado. Para fluidos. Material que por colada se queda dentro de una etapa (en nuestro proceso, siempre es 0).

7.2.1. Balances de materia

Balance de materias del carbón activo

Pérdidas en el almacenamiento

Antes de ser cargado en camiones cisternas o ser empaquetado, el carbón activo se almacenara en los silos de almacenamiento. En estos silos, tanto en el transporte hasta llegar a ellos, como en el propio silo, habrá una pérdida de material por erosión con las paredes de los recipientes y de las tuberías. Suponiendo unas pérdidas del 1,12 % se obtiene que deben llegar a la entrada de los silos:

- $1,370 \text{ t/colada} + (1,370 \text{ t/colada} \times 0,0112) = \underline{1,385 \text{ t}}$ a la entrada del silo de almacenamiento por colada.

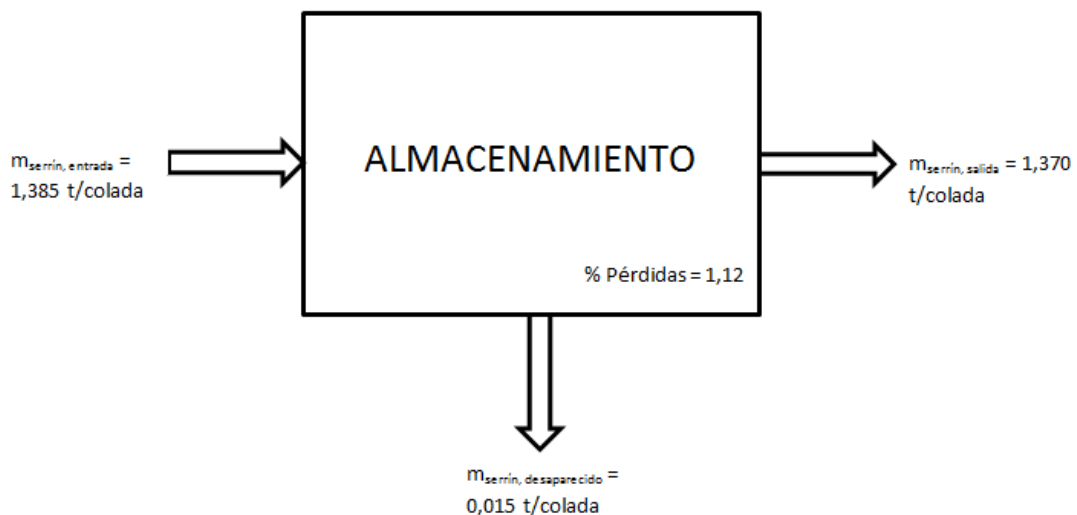


FIG. 58. BALANCE DE MATERIAS ALMACENAMIENTO.

Pérdidas en secado

Se tienen unas pérdidas del 13,73 % en el paso de la corriente de aire, ya que el tiempo de residencia es alto en el secador, y aunque, en la primera fase, el carbón viene húmedo y no se elimina mucho material en esas condiciones, no es hasta que está completamente seco, que pierde material en forma de polvo y cenizas, y aunque estos son recuperados en los ciclones, no se reutilizan y se pierden como residuo sólido:

- $1,385 \text{ t/colada} + (1,385 \text{ t/colada} \times 0,1373) = \underline{1,576 \text{ t}}$ a la entrada del secador por cada ciclo de producción.

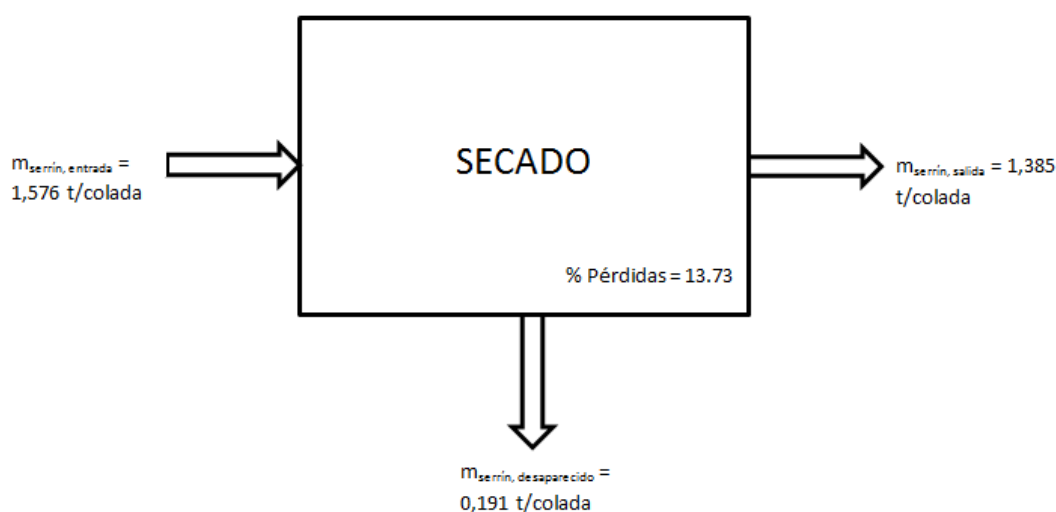


FIG. 59. BALANCE DE MATERIAS SECADO.

Pérdidas en lavado

No existe pérdida de producto principal. Ya que el material carbonoso es compacto, y al estar húmedo la retención de polvos y cenizas es absoluta. Se desprecia esta pérdida. Sin embargo, se tienen en cuenta aquí las pérdidas que existen en el transporte del carbón hasta la columna

lavadora. El material, que es una maseta de carbón y ácido viene a alta temperatura y enfriándose, de manera que gana en viscosidad por el ácido. Es transportado por un tornillo sin fin. Las pérdidas son de un 0,14 % teniendo que ser la cantidad a la salida del horno de:

- $1,576 \text{ t/colada} + (1,576 \text{ t/colada} \times 0,0014) = \underline{1,578 \text{ t}}$ en la boca de salida del horno por colada.

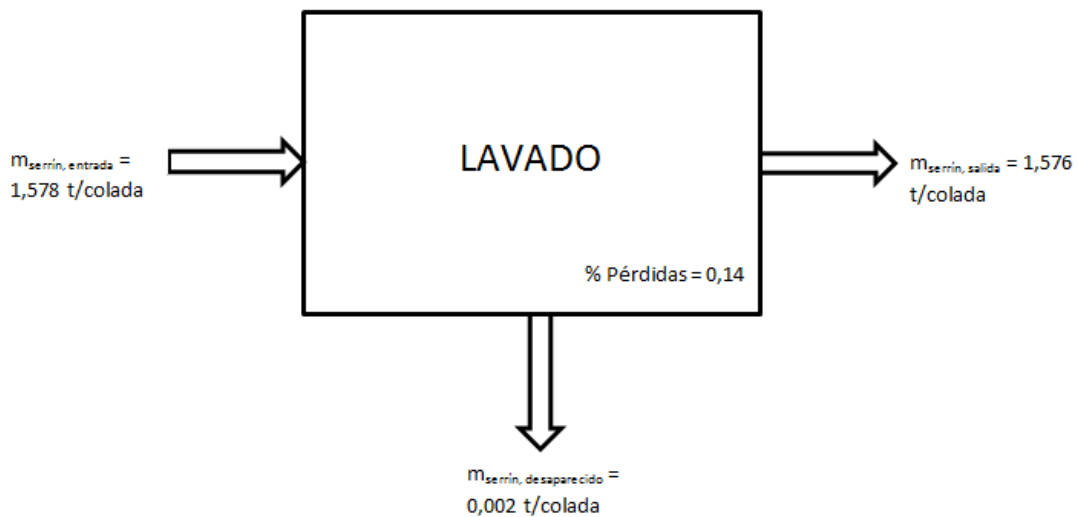


FIG. 60. BALANCE DE MATERIAS LAVADO.

Pérdidas en el horno

Parte principal del proceso y pérdida máxima de la cantidad inicial de materia prima utilizada. La madera está formada de carbono, hidrógeno y oxígeno (también nitrógeno pero en proporciones despreciables en este caso). En la carbonización, todo el hidrógeno, oxígeno y parte del carbono se eliminan en forma de hidrocarburos que se eliminan por el escape de gases del horno. Es una calcinación de la madera.

El rendimiento de carbonización en este proceso se calcularía de manera óptima en planta piloto, pero los datos que se han escogido para este diseño se encontraron en bibliografía a distintos gradientes de temperatura, siendo el utilizado el de mayor rendimiento, es decir, 4 fases, secado/precarbonización, carbonización, activación y enfriamiento con un valor de gradiente total del proceso de 50 °C (siendo el proceso dividido en 2, yendo el primero desde 100 °C – hasta 500 °C, y la segunda fase de 500 °C – hasta 150 °C). De esta forma se obtiene que las pérdidas en el horno son de 56,80% [39].

De esta manera si se han obtenido 1,578 toneladas de carbón a la salida del horno:

- $1,578 \text{ t/colada} + (1,578 \text{ t/colada} \times 0,5680) = \underline{2,474 \text{ t}}$ de serrín a la entrada del horno.

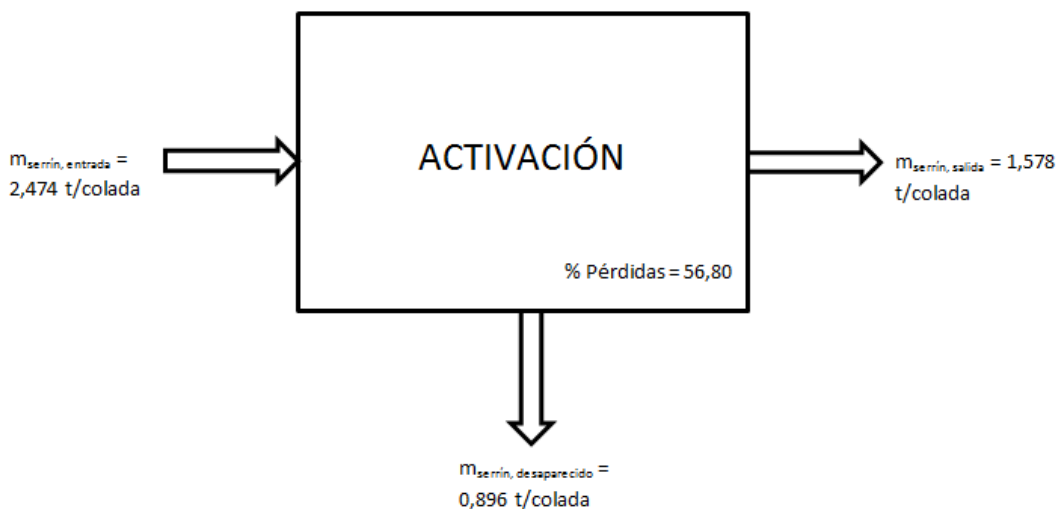


FIG. 61. BALANCE DE MATERIAS HORNO.

Pérdidas en la fase de mezclado: Impregnación

El serrín llega al tanque mezclador por medio de un elevador de cangilones con tronco de escamas desde el depósito de serrín. No existe perdidas en el desprendimiento de serrín desde los cangilones al tanque, pero sí que existe pérdida, ya que se queda material en los cangilones, siendo así la pérdida de 0,1%. El tanque está situado encima del horno rotatorio. El vaciado del tanque se realiza por gravedad a través de una tubería cerrada. No existe pérdida en el vaciado ya que el tanque es limpiado manualmente mientras se vacía.

De esta manera se entiende que no hay pérdidas hasta el horno, porque, sabiendo que en el tanque mezclador tiene que haber 2,474 t/colada, aunque existan pérdidas en el proceso anterior de transporte de serrín, el tanque será llenado hasta la cantidad objetivo. Siendo así despreciadas las perdidas en el transporte por elevador de cangilones que son mínimas.

Así pues con una masa inicial de 2,424 t/colada de serrín se obtiene 1,370 t/colada de carbón activo, siendo el rendimiento del proceso en masa de carbón activo hecho por masa de serrín utilizado de:

$$\frac{1,370}{2,424} \times 100 = 55,38 \%$$

Balance de materia del ácido fosfórico

El ácido fosfórico entra en el proceso en el tanque mezclador. De ahí va al horno sin pérdidas, siendo en este donde, por evaporación y formación de compuestos inorgánicos, se obtienen las primeras pérdidas. De manera experimental se sabe que el porcentaje m/m de pérdidas de ácido fosfórico en el horno rotatorio son del 47,15%.

A la salida de este y por el transcurso del tornillo sin fin existen pérdidas, ya que, a medida que se va enfriando el ácido gana en viscosidad. Aun así son mínimas llegando al porcentaje de 0,25% de lo que llega de ácido a la torre lavadora.

En la torre el ácido fosfórico es arrastrado por completo con agua y eliminándose por completo del carbón activo. A partir de aquí, el ácido es transportado hasta el depósito de almacenamiento de ácido diluido, para ser recuperado por el suministrador y su consiguiente reutilización.

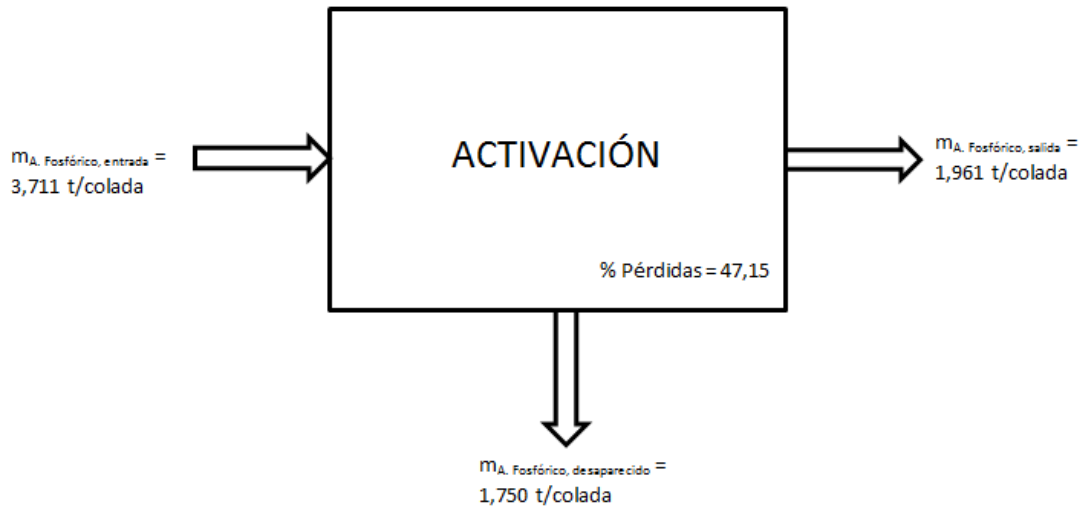
Para calcular la cantidad de fosfórico, se sabe que la relación de uso de materiales en el proceso es 1:1,5, por lo tanto 40% de serrín, 60% de H_3PO_4 , entonces la masa inicial de ácido fosfórico será:

- $2,474 \text{ t serrín/colada} = 40\% \text{ de mezcla.}$
- $x \text{ t ácido fosfórico/colada} = 60\% \text{ de mezcla.}$
- $x = 3,711 \text{ t ácido fosfórico/colada.}$

Esta cantidad será la que exista tanto en el tanque mezclador como a la entrada del horno rotatorio.

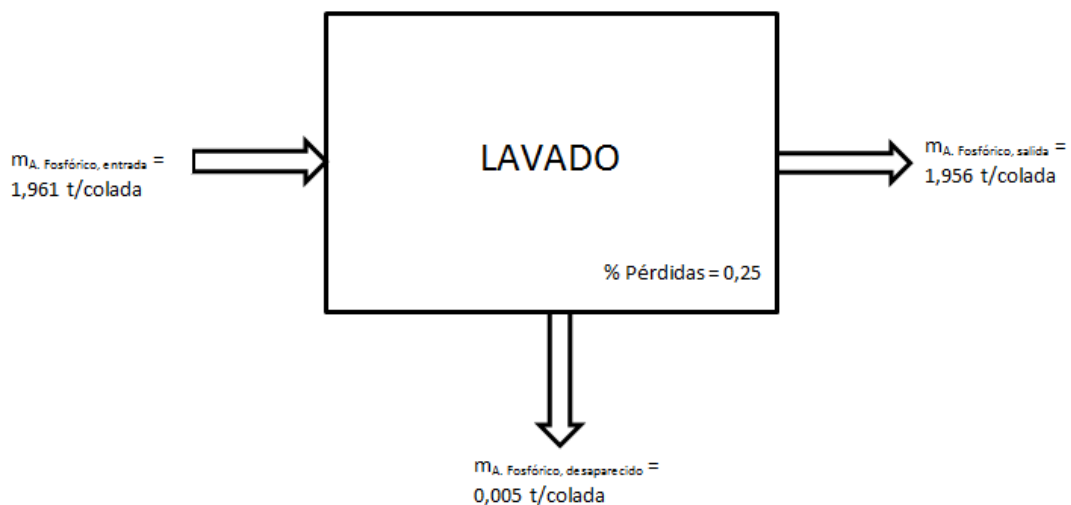
Por lo tanto a la salida del horno quedará:

- $3,711 \text{ t } H_3PO_4/\text{colada} - (3,711 \text{ t } H_3PO_4/\text{colada} \times 0,4715)$
 $= \underline{1,961 \text{ t } H_3PO_4}$ a la salida del horno por colada
mezclado con el carbón.

FIG. 62. BALANCE DE MATERIAS H_3PO_4 , HORNO.

Contabilizando la última pérdida en el tornillo sin fin que lleva la mezcla a la columna de lavado, se sabrá cuánta cantidad de fosfórico se eliminará en la torre de lavado y que se podría recuperar:

- $1,961 \text{ t H}_3\text{PO}_4/\text{colada} - (1,961 \text{ t H}_3\text{PO}_4/\text{colada} \times 0,0025) = \underline{1,956 \text{ t H}_3\text{PO}_4}$ llegan a la columna de lavado.

FIG. 63. BALANCE DE MATERIAS H_3PO_4 , LAVADO.

Esta cantidad posteriormente se eliminará por medio de ciclos de agua, calculados en el apartado de cálculos de aparatos y en el apartado de bombas y tuberías.

7.2.2. Balance de energía

Existe un intercambio de energía en la fase de mezclado, ya que, el fosfórico tiene una viscosidad alta a temperatura ambiente, y un punto de fusión de 21,1 °C, con lo cual haría que el riesgo de taponamiento o una pérdida grande de carga en las tuberías, diese problemas a la hora de puesta en marcha. Por esto, se trabaja con unas condiciones, que se dan en el depósito de ácido fosfórico inicial, de 90 °C.

Experimentalmente, se sabe que en estas condiciones, la disolución de ácido fosfórico al 85% tiene una viscosidad aproximadamente a la del agua [40]. Este dato no solo vale, para el cálculo del apartado de tuberías, con el cual, al comportarse como agua se utilizan las mismas tablas del fabricante de bombas y tuberías tanto para el agua, como para la ácido, sino que además, “se ayuda” al horno en la fase de calentamiento inicial del producto, es decir, se gasta menos cantidad de vapor, ya que la variación de temperatura es menor.

La ecuación 7, sirve para hacer los balances de energía también, pero cambiando las unidades en valor energético.

Otras ecuaciones que se utilizan son:

$$Q = m \times Cp \times (\Delta T) \quad \text{Ecuación 8.}$$

Siendo:

- Q: Energía (J). Calor producido por un material del proceso.
- m: Masa (kg). Cantidad de material.

- C_p : Calor específico ($J/kg^{\circ}C$). Cantidad de energía necesaria para elevar un grado un kilogramo de material.
- ΔT : Variación temperatura ($^{\circ}C$). Diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida en las etapas del proceso.

El balance de energía que se va a realizar, es en el horno rotatorio.

Este está dividido en 4 zonas, como se ha explicado en el funcionamiento: Secado/precarbonización, carbonización, activación y enfriamiento.

Los cuerpos de calentamiento del horno se realizan con intercambiadores distintos. Los tres primeros usan el mismo fluido caliente, vapor sobrecalentado, pero de calderas distintas, ya que en cada cuerpo se necesita una cantidad y condiciones de fluido distintos como la temperatura, la presión, etc. ya sea, por el calor necesitado o por el tiempo en dicha zona. En la fase de enfriamiento, ya con el carbón activo y el ácido fosfórico restante, se utiliza un circuito de tuberías con agua de la red de agua de la empresa.

Para este proceso se utilizarán unos calores específicos obtenidos por bibliografía [41], estos calores específicos deben ser calculados experimentalmente tanto para la madera, como para el ácido fosfórico y como para el carbón activo como producto final. Se utilizan para todas las fases del horno:

- $C_{p_{\text{serrín}}} = 1.459 J/kg^{\circ}C$.
- $C_{p_{\text{a. fosfórico}}} = 1.298 J/kg^{\circ}C$.
- $C_{p_{\text{carbón activo}}} = 937,5 J/kg^{\circ}C$.

Las masas en el horno permanecen constantes durante las tres primeras fases, siendo en la última, cuando se

expone el producto a atmosfera libre, cuando los gases y polvos son eliminados del producto:

- $m_{\text{serrín}} = 2.474 \text{ kg.}$
- $m_{\text{a. fosfórico}} = 3.711 \text{ kg.}$

Balance de energía del mezclado

Se saben las cantidades de serrín y de ácido fosfórico que se van a meter por colada en el mezclado. La temperatura del serrín es temperatura ambiente ($T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$). su calor será igual a:

- $Q_{\text{serrín}} = m_{\text{serrín}} \times C_{p_{\text{serrín}}} \times (T_{\text{caliente}} - T_{\text{fría}});$
- $Q_{\text{serrín}} = 2.474 \text{ kg/colada} \times 1.459 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \times (X - 20)^{\circ}\text{C};$
- $Q_{\text{serrín}} = 3.609.566X \text{ J/colada }^{\circ}\text{C} - 72.191.320 \text{ J/colada.}$

y la del ácido fosfórico en el depósito y por su circuito de tuberías es de $T = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$. con lo cual al introducirlo en el tanque de mezclado su calor es:

- $Q_{\text{a. fosfórico}} = m_{\text{a. fosfórico}} \times C_{p_{\text{a. fosfórico}}} \times (T_{\text{caliente}} - T_{\text{fría}});$
- $Q_{\text{a. fosfórico}} = 3.711 \text{ kg/colada} \times 1.298 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \times (90 - X)^{\circ}\text{C};$
- $Q_{\text{a. fosfórico}} = 433.519.020 \text{ J/colada} - 4.816.878X \text{ J/colada }^{\circ}\text{C.}$

No existen pérdidas de calor en el mezclado está aislado completamente.

Despejando la X, da una temperatura de mezcla de salida del tanque mezclador, y por lo tanto con la que entra en el horno igual a:

- $3.609.566X + 4.816.878X = 433.519.020 + 72.191.320;$

$$X = 505.710.340 / 8.426.444 = 60,0 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

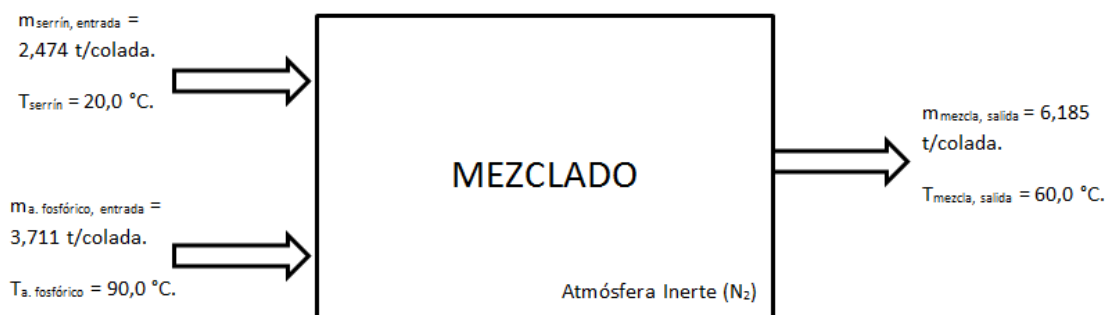


FIG. 64. BALANCE DE ENERGÍAS MEZCLADOR.

Balance de energía 1ª fase: Secado/precarbonización

Primera fase del horno rotatorio. La mezcla serrín más fosfórico, entra al horno alrededor de 60,0 °C proveniente del tanque de mezclado. Son las condiciones del mezclado ya que para evitar la viscosidad, alta, del fosfórico a temperatura ambiente y su posible fusión, se introduce el fosfórico al inicio del proceso inicial con temperatura elevada como se citó anteriormente.

Esta primera sección corresponde con el secado y previa carbonización del producto. La temperatura llega hasta los 200 °C y el producto está un tiempo de residencia de 30 min (1.800 segundos). La masa de la mezcla permanece constante durante el calentamiento ya que la alimentación del horno no es continua, sino que, se hace por ciclos (discontinua).

El fluido que se usa para la transmisión de calor es vapor sobrecalentado:

- Temperatura de entrada = 400 °C.
- Temperatura de salida = 150 °C .
- Presión = 0,06 atm.
- $C_{p_{400^{\circ}\text{C}}} = 9843,5 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$.

Se trabaja con un calor específico medio entre las dos temperaturas de vapor. En las tablas utilizadas el valor de vapor a 150 °C no consta. Por lo tanto, se realiza una interpolación entre los valores de 160 y 120 °C de la siguiente forma:

$$C_{p_{160^{\circ}\text{C}}} = 8969,3 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}.$$

$$C_{p_{120^{\circ}\text{C}}} = 8784,0 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}.$$

$$\text{Siendo } C_{p_{150^{\circ}\text{C}}} = \frac{160-120}{150-120} = \frac{8969,3-8784,0}{X-8784,0} ;$$

$$C_{p_{150^{\circ}\text{C}}} = 8923,0 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}.$$

Obteniendo como Cp medio:

$$C_{p_{\text{promedio}}} = \frac{(9843,5+8923,0)}{2} = 9383,25 \frac{\text{J}}{\text{kg}}^{\circ}\text{C}.$$

Teniendo las condiciones del fluido caliente se calcula el calor necesario para aumentar la temperatura de la mezcla de 60,0 a 200 °C:

$$Q_{\text{mezcla}} = [m_{\text{serrín}} \times C_{p_{\text{serrín}}} \times (200-60)] + [m_{\text{a. Fosfórico}} \times C_{p_{\text{a. Fosfórico}}} \times (200 - 60)];$$

$$Q_{\text{mezcla}} = [2.474 \text{ kg} \times 1.459 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \times 140^{\circ}\text{C}] + [3.711 \text{ kg} \times 1.298 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \times 140^{\circ}\text{C}]$$

$$Q_{\text{mezcla}} = 1179665808,4 \text{ J} = 1,18 \times 10^9 \text{ J}.$$

Este calor es el que tiene que aportar el fluido caliente en 30 minutos. Y por lo tanto, el flujo másico de vapor sobrecalentado será:

$$\dot{m} = Q / C_p \times (\Delta T) \times t ;$$

$$\dot{m} \text{ (1ª fase)} = 1,18 \times 10^9 \text{ J} / [9.383,25 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times (400 - 150) ^\circ\text{C} \times 1.800 \text{ s} ;$$

$$\dot{m} = \underline{0,2794 \text{ kg/s.}}$$

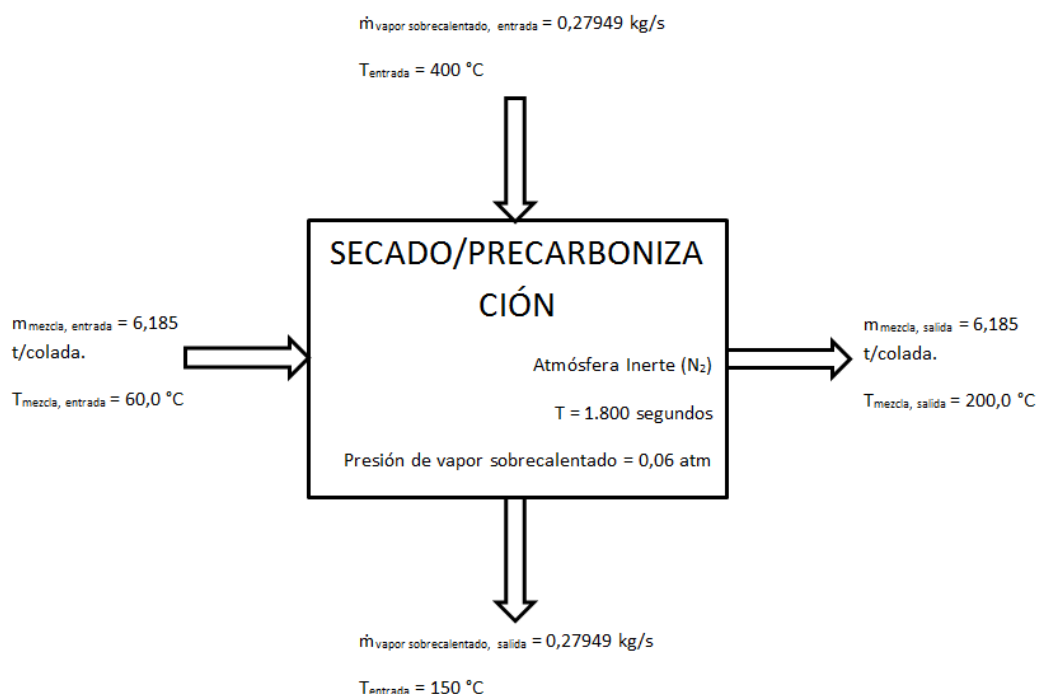


FIG. 65. BALANCE DE ENERGÍAS 1ª FASE.

Balance de energía 2ª fase: Carbonización

Segunda fase del horno rotatorio. La mezcla serrín más fosfórico, está a $200,0 ^\circ\text{C}$. Empiezan a formarse los poros y los gases de fósforo.

Esta sección corresponde con la carbonización del producto. La temperatura llega hasta los $400 ^\circ\text{C}$ y el producto está un tiempo de residencia de 100 min (6.000 segundos).

El fluido que se usa para la transmisión de calor es vapor sobrecalentado:

- Temperatura de entrada = 600 °C.
- Temperatura de salida = 435 °C .
- Presión = 1,48 atm.
- $C_{p_{600^{\circ}\text{C}}} = 8910,0 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$.

Se trabaja con un calor específico medio entre las dos temperaturas de vapor. En las tablas utilizadas el valor de vapor a 435 °C no consta. Por lo tanto, se realiza una interpolación entre los valores de 440 y 400 °C de la siguiente forma:

$$C_{p_{440^{\circ}\text{C}}} = 8475,7 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}.$$

$$C_{p_{400^{\circ}\text{C}}} = 8355,5 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}.$$

$$\text{Siendo } C_{p_{435^{\circ}\text{C}}} = \frac{440-400}{435-400} = \frac{8475,7-8355,5}{X-8355,5} ;$$

$$C_{p_{435^{\circ}\text{C}}} = 8460,7 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}.$$

Obteniendo como C_p medio:

$$C_{p_{\text{promedio}}} = \frac{(8910,0+8460,7)}{2} = 8685,4 \frac{\text{J}}{\text{kg}}^{\circ}\text{C}.$$

Teniendo las condiciones del fluido caliente se calcula el calor necesario para aumentar la temperatura de la mezcla de 200,0 a 400,0 °C:

$$Q_{\text{mezcla}} = [m_{\text{serrín}} \times C_{p_{\text{serrín}}} \times (400 - 200)] + [m_{\text{a. Fosfórico}} \times C_{p_{\text{a. Fosfórico}}} \times (400 - 200)];$$

$$Q_{\text{mezcla}} = [2.474 \text{ kg} \times 1.459 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \times 200^{\circ}\text{C}] + [3.711 \text{ kg} \times 1.298 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \times 200^{\circ}\text{C}]$$

$$Q_{\text{mezcla}} = 1685236869,2 \text{ J} = 1,68 \times 10^9 \text{ J}.$$

Este calor es el que tiene que aportar el fluido caliente en 1 hora y 40 minutos. Y por lo tanto, el flujo másico de vapor sobrecalentado será:

$$\dot{m} = Q / C_p \times (\Delta T) \times t ;$$

$$\dot{m} \text{ (2ª fase)} = 1,68 \times 10^9 \text{ J} / [8685,4 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times (600 - 435) ^\circ\text{C} \times 6.000 \text{ s} ;$$

$$\dot{m} = \underline{0,1960 \text{ kg/s.}}$$

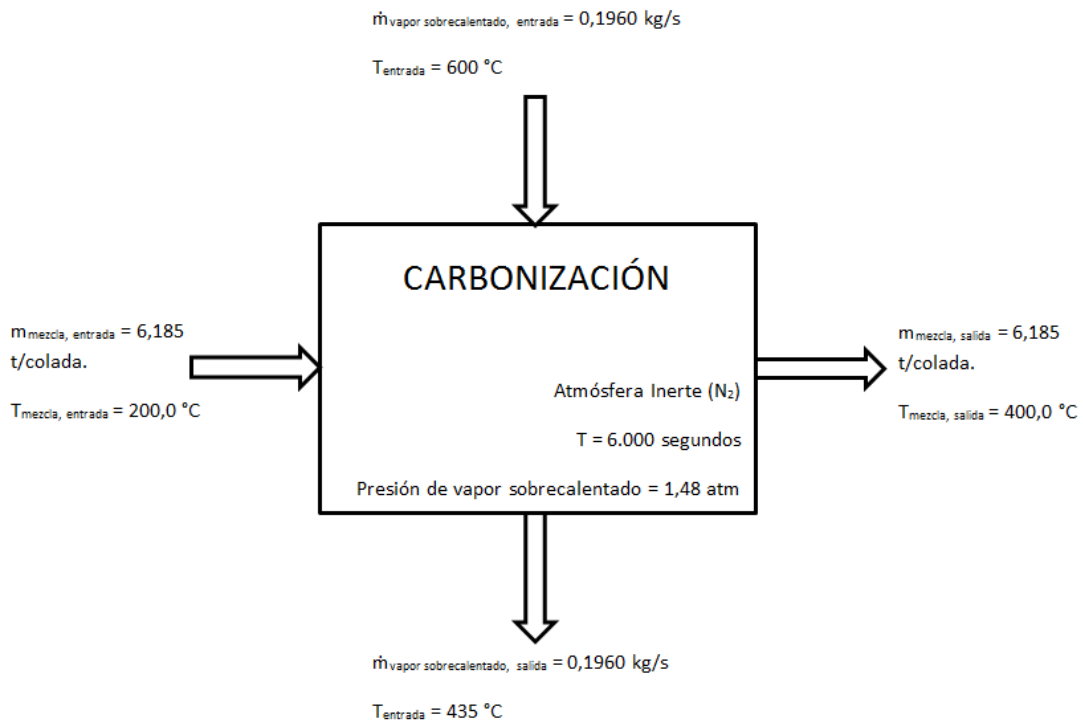


FIG. 66. BALANCE DE ENERGÍAS 2ª FASE.

Balance de energía 3ª fase: Activación

Tercera fase del horno rotatorio. La mezcla serrín más fosfórico, está a 400,0 °C. El tiempo de residencia y la temperatura que se alcanza, marcan el producto que se realiza.

Esta sección corresponde con la activación del producto. La temperatura llega hasta los 500 °C y el producto está un tiempo de residencia de 150 min (9.000 segundos).

El fluido que se usa para la transmisión de calor es vapor sobrecalentado:

- Temperatura de entrada = 700 °C.
- Temperatura de salida = 550 °C .
- Presión = 17,66 atm.
- $C_{p_{700^{\circ}\text{C}}} = 7948,7 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$.

Se trabaja con un calor específico medio entre las dos temperaturas de vapor. En las tablas utilizadas el valor de vapor a 550 °C no consta. Por lo tanto, se realiza una interpolación entre los valores de 600 y 540 °C de la siguiente forma:

$$C_{p_{600^{\circ}\text{C}}} = 7702,4 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}.$$

$$C_{p_{540^{\circ}\text{C}}} = 7543,4 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}.$$

$$\text{Siendo } C_{p_{550^{\circ}\text{C}}} = \frac{600-540}{550-540} = \frac{7702,4-7543,4}{X-7543,4} ;$$

$$C_{p_{550^{\circ}\text{C}}} = 7569,9 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}.$$

Obteniendo como C_p medio:

$$C_{p_{\text{promedio}}} = \frac{(7986,7+7569,9)}{2} = 7759,3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}^{\circ}\text{C}.$$

Teniendo las condiciones del fluido caliente se calcula el calor necesario para aumentar la temperatura de la mezcla de 400,0 a 500,0 °C:

$$Q_{\text{mezcla}} = [m_{\text{serrín}} \times C_{p_{\text{serrín}}} \times (500 - 400)] + [m_{\text{a. Fosfórico}} \times C_{p_{\text{a. Fosfórico}}} \times (500 - 400)];$$

$$Q_{\text{mezcla}} = [2.474 \text{ kg} \times 1.459 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \times 100^{\circ}\text{C}] + [3.711 \text{ kg} \times 1.298 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \times 100^{\circ}\text{C}]$$

$$Q_{\text{mezcla}} = 842618434,6 \text{ J} = 8,43 \times 10^8 \text{ J}.$$

Este calor es el que tiene que aportar el fluido caliente en 2 hora y 30 minutos. Y por lo tanto, el flujo másico de vapor sobrecalentado será:

$$\dot{m} = Q / C_p \times (\Delta T) \times t ;$$

$$\dot{m} \text{ (3ª fase)} = 8,43 \times 10^8 \text{ J} / [7759,3 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times (700 - 550) ^\circ\text{C} \times 9.000 \text{ s} ;$$

$$\dot{m} = \underline{0,0804 \text{ kg/s.}}$$

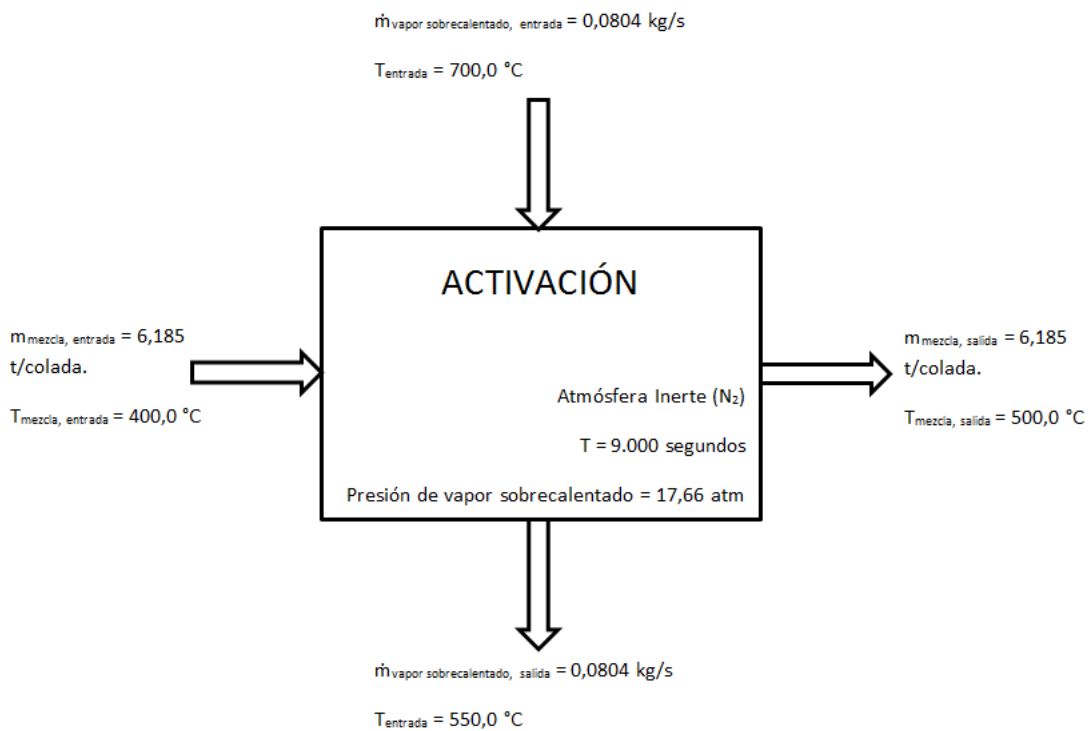


FIG. 67. BALANCE DE ENERGÍAS 3ª FASE.

Balance de energía 4ª fase: Enfriamiento

Cuarta fase del horno rotatorio. La mezcla serrín más fosfórico se convierte en carbón activo impregnado en ácido fosfórico. Se encuentra a 500,0 °C.

Se debe enfriar rápidamente para parar la formación de gases y aumento de número de poros en él.

Esta sección corresponde con el enfriamiento del producto. La temperatura desciende hasta los 150 °C y el producto está un tiempo de residencia de 20 min (1.200 segundos).

El fluido que se usa para la transmisión de calor (en este caso absorción de calor) es agua líquida:

- Temperatura de entrada = 20 °C.
- Temperatura de salida = 75 °C .
- Presión = 1,00 atm.
- $C_{p_{\text{agua}}} = 4180,0 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

La variación del calor específico del agua líquida desde 20 °C hasta los 100 °C, es del orden de 10^{-4} , por lo tanto, se considera despreciable para los cálculos.

La masa de mezcla en esta fase es ya considerada la de salida del horno, por lo que se toma las masas de carbón activo y ácido fosfórico obtenidas en el apartado de balances de materia:

- $m_{\text{carbón activo}} = 1.576 \text{ kg}$.
- $m_{\text{a. fosfórico}} = 1.961 \text{ kg}$.

Teniendo las condiciones del fluido frío se calcula el calor que debe absorber para que nuestro producto salga a 150 °C, bajando desde 500°C:

$$Q_{mezcla} = [m_{serrín} \times Cp_{serrín} \times (150 - 500)] + [m_{a. Fosfórico} \times Cp_{a. Fosfórico} \times (150 - 500)];$$

$$Q_{mezcla} = [1.576 \text{ kg} \times 1.459 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times (-350)^\circ\text{C}] + [1.961 \text{ kg} \times 1.298 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times (-350)^\circ\text{C}]$$

$$Q_{mezcla} = -1695437791,5 \text{ J} = -1,70 \times 10^9 \text{ J}.$$

Este calor es el que tiene que aportar el fluido caliente en 20 minutos. Y por lo tanto, el flujo másico de agua líquida será:

$$\dot{m} = Q / Cp \times (\Delta T) \times t ;$$

$$\dot{m} (4^a \text{ fase}) = -1,70 \times 10^9 \text{ J} / [4180,0 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times (20 - 75) ^\circ\text{C} \times 1.200 \text{ s};$$

$$\dot{m} = \underline{6,1456 \text{ kg/s}}.$$

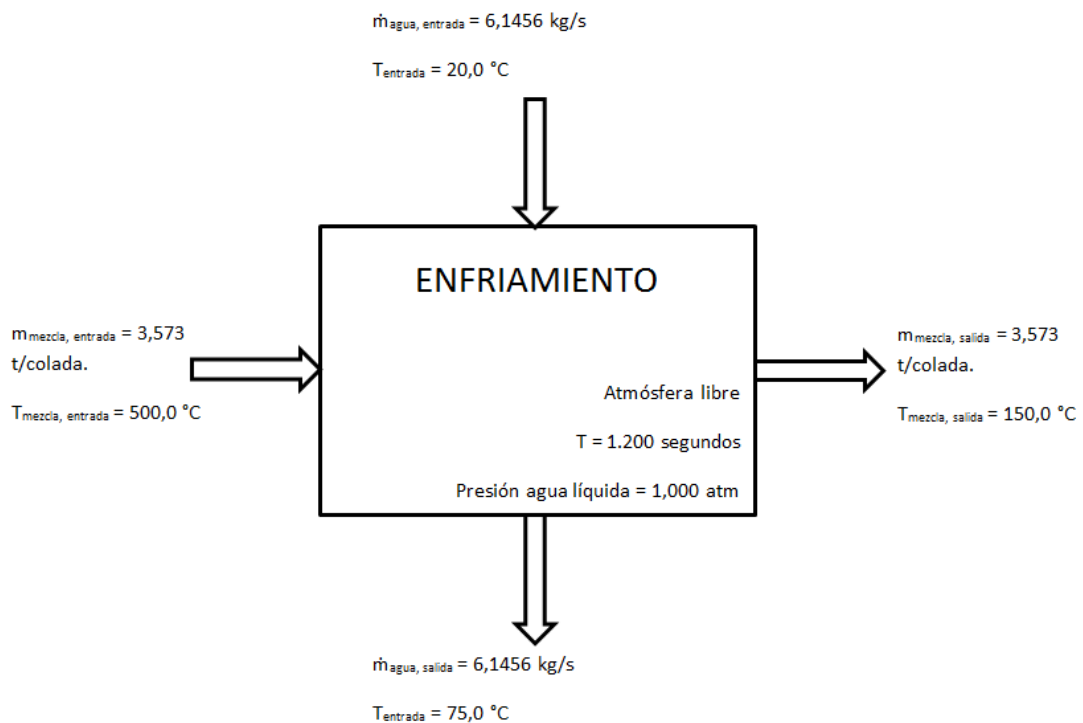


FIG. 68. BALANCE DE ENERGÍAS 4ª FASE.

7.3. Cálculo del volumen del horno: Volúmenes materias primas y reactivos

Se va a calcular el volumen de serrín y ácido fosfórico por colada. Cálculos necesarios para el resto de operaciones que se realizan.

El volumen del horno es calculado en base a las cantidades objetivos de precursor y agente activante que se necesitan por ciclo completo de producción.

Así pues los volúmenes de serrín y ácido fosfórico son:

- $V_{\text{serrín}} = m/\rho = 2.474 \text{ kg}/570 \text{ kg/m}^3 = 4,34 \text{ m}^3$.
- $V_{\text{a. Fosfórico}} = m/\rho = 3.711 \text{ kg}/1.350 \text{ kg/m}^3 = 2,75 \text{ m}^3$.

Siendo la densidad del fosfórico a temperatura de 90 °C. Esto daría un volumen de mezcla de 7,09 m³. Con este volumen de mezcla se podría calcular, en teoría, el volumen del horno para este proceso. Pero experimentalmente se sabe que el ácido fosfórico pierde un 15% de su volumen al mezclarse con el serrín e introduciéndose en los huecos que deja libre.

Por lo tanto, el volumen real que aumenta el H₃PO₄ es:

- $V_{\text{a. Fosfórico, real}} = 2,75 - (2,75 \times 0,15) = 2,3375 \text{ m}^3$.

Así pues el volumen real de mezcla es:

- $V_{\text{mezcla, real}} = 4,34 + 2,34 = 6,68 \text{ m}^3$.

Se conoce entonces, que el volumen que se necesita de horno es 6,68 m³. Dicho volumen es el volumen práctico del horno, que gracias a estudios experimentales obtenidos por fuentes de información y a los consejos de empleo del

fabricante, debe ser un volumen máximo de llenado del horno del 13%.

7.4. Selección de los equipos

7.4.1. Equipos para la recepción y almacenamiento de materias primas, reactivos y productos.

Almacén de la materia prima y Almacén del producto final

La recepción de los troncos de madera se realiza desde los camiones hasta un almacén, siendo transportados por una cinta transportadora plana. Lo mismo que el producto final desde los depósitos de carbón activo es llevado al almacén donde se encuentra la ensacadora, para el producto de carbón activo que se comercializa en saco.

Los dos almacenes son iguales en dimensiones, teniendo los siguientes datos técnicos:

- Marca: WOLF.
- Material: Chapa galvanizada.
- Altura (m): 10.
- Longitud (m): 50,0.
- Ancho (m) = 20,0.

Los almacenes son de área rectangular, por lo que la superficie a utilizar es de:

$$A \text{ (m}^2\text{)} = \text{longitud} \times \text{ancho} = 50 \times 20 = 1.000,0 \text{ m}^2.$$

Depósito de serrín

Sirve para almacenar y dosificar el serrín en el proceso. Su forma geométrica es cilíndrica y sus características son:

- Marca: WOLF.
- Material: Hormigón armado.
- Altura (m): 12,5.
- Diámetro (m): 5,0.

Por lo que su volumen será:

$$V \text{ (m}^3\text{)} = \pi r^2 x h = \pi x 2,5^2 x 12,5 = 245,44 \text{ m}^3 \text{ de volumen.}$$

Al día se necesitan $8,70 \text{ m}^3$ de serrín, lo que quiere decir que si está lleno, podría abastecer a la planta, en caso de avería, durante 28 días.

Silos de distribución de H_3PO_4

Depósitos muy importantes que añaden el agente activante al proceso. Se tienen tres, uno por colada, y otro de reserva, de idénticas medidas, se calculan sus volúmenes según la cantidad de ácido fosfórico se debe añadir:

Temperatura de trabajo del H_3PO_4 (°C): 90.

- $m_{A. \text{ Fosfórico}} \text{ (kg)} = 3.711.$
- $\rho_{A. \text{ Fosfórico, } 90^\circ\text{C}} \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1.350.$
- $V_{A. \text{ Fosfórico, } 90^\circ\text{C}} \text{ (m}^3\text{)} = 3.711 / 1.350 = 2,75.$

Como el fabricante los hace a medida se elige un volumen de depósito de 3 m^3 , y un diámetro de 1 m. Por lo que la altura de estos depósitos será:

$$V = \pi r^2 x h; h = V / \pi r^2 = 3,82 \text{ m.}$$

El material elegido es acero inoxidable porque a altas temperaturas es estable al ácido. Por lo tanto los datos técnicos de los depósitos serán:

- Marca: SOLIDS system.
- Material: Acero inoxidable.
- Altura (m): 3,82.
- Diámetro (m): 1,0.
- Volumen (m^3) = 3,0.

Depósito de disolución ácida diluida

Depósito de acero inoxidable, que sirve para almacenar el ácido diluido. Se tienen dos depósitos exactamente iguales.

Se calculan sus volúmenes en base a la cantidad de disolución por día que reciben y a la de días que tienen que almacenar la disolución. Entonces:

$$V_{A. \text{ Fosfórico/colada}} (m^3) = 1.961,0 \text{ kg} / 1.680 \text{ kg}/m^3 = 1,1643 m^3/\text{colada}.$$

Por lo tanto al día se absorberá $2,33 m^3$ de ácido. Como se quiere tener al 5% de concentración y contando al ácido como casi puro, se sabe que la cantidad al día de agua que se va a utilizar, y por lo tanto, se va a introducir en el depósito es:

- $V_{\text{Agua}} = 2,33 \times (100/5) = 46,6 m^3.$
- $V_{\text{Dson./día}} = 46,6 + 2,33 = 48,9 m^3.$

El suministrador viene a por todo el ácido guardado de 5 días, por lo tanto el volumen entre los dos depósitos que deben tener es:

$$V_{\text{Dson./5 días}} = 48,9 \times 5 = 244,65 m^3.$$

Como el fabricante los diseña a medida, se coge un volumen igual a $250,0 \text{ m}^3$ por lo tanto cada depósito tendrá $125,0 \text{ m}^3$. Teniendo una altura de 10 m, su diámetro será:

$$V = \pi r^2 x h; r = \sqrt{\frac{V}{\pi x h}} = 2,0 \text{ m.}$$

Ficha técnica de los depósitos:

- Marca: SOLIDS system.
- Material: Acero inoxidable.
- Altura (m): 10,0.
- Diámetro (m): 4,0.
- Volumen (m^3) = 125,0.

Depósito de Carbón activo a granel

Se obtienen 1.370 kg por colada de carbón activo lo que al día significa 2.740 kg.

Este depósito abastece también a la ensacadora, por eso es de un volumen suficiente como para no ser vaciado en algún caso particular.

$$\rho_{CA} (\text{kg}/\text{m}^3) = 2.100.$$

$$V_{CA/\text{día}} (\text{m}^3) = 1,305.$$

Ficha técnica del depósito:

- Marca: WOLF.
- Material: Hormigón armado.
- Altura (m): 15,0.
- Diámetro (m): 6,0.
- Volumen (m^3) = 424,0.

Volumen requerido para que el porcentaje de llenado respecto a la cantidad de un mes sea del 10%.

7.4.2. Aparatos principales del proceso

Tanque de mezclado

Se calcula por el espacio que se desea ocupar, y por la cantidad de volumen por colada que se introduce.

Calculando el volumen por colada contando el volumen que pierde el ácido fosfórico por ocupar los huecos libres que deja el serrín, sale un volumen de mezcla por colada igual a $6,68 \text{ m}^3$. Con este dato se elige desde el catalogo del fabricante el tanque mezclador con el volumen de seguridad más parecido al volumen por colada del proceso y que tenga un diámetro de 2,0 metros. Su ficha técnica:

- Marca: Bachiller.
- Modelo: Turbomix (MHT).
- Material: Acero inoxidable.
- Disposición espacial: Colocación horizontal.
- Volumen del tanque (m^3): 12,0.
- Volumen de carga máximo de seguridad (m^3): 8,0.
- Volumen de llenado (m^3): 6,68.
- % de Volumen ocupado (%): 55,67.
- Longitud (m): 3,82 m.
- Diámetro (m): 2,00 m.
- Tiempo de mezclado (h): 1-5.
- Potencia del removedor (KW): 7,5.
- Peso (t): 7,5.

Horno rotatorio

Los grados de llenado del horno rotatorio, fluctúan entre los límites 5-17 %. En la explotación práctica del horno, el grado de llenado no debe pasar del 13 %, pues valores superiores empeoran la transmisión de calor.

Por lo tanto se debe comprar un horno rotatorio con diámetro uniforme con un volumen mínimo de:

$$6,81 \times (100/13) = \underline{52,24 \text{ m}^3} \text{ de volumen del horno.}$$

Se tiene calculado el espacio, en longitud, que se quiere ocupar con el horno. Dicha longitud es de 10 metros, luego el diámetro del horno debe ser:

$$V_{\text{horno}} = \pi r^2 x h; r = \sqrt{\frac{V_{\text{horno}}}{\pi x h}} = 1,28655 \text{ m}$$

Este es el diámetro interior de 2,57 m. El ángulo exterior del horno es de 3,10 m. El ángulo de inclinación que va a tener es de 4%, quiere decir, que por cada 100 metros de horno bajaría 4 metros, como tiene 10, bajará 0,4 metros de la horizontal.

Entonces como el producto se recoge en planta baja, el horno se divide entre su parte inicial que estará en la planta 1ª y su parte final que estará en la planta calle. La parte más baja se encuentra a una altura de 3,0 metros, y sube 0,4, quiere decir, que la parte inicial del horno se encuentra a 3,4 la parte inferior, luego, la parte más alta del horno se encuentra a:

$$3,40 + 3,10 = 6,50 \text{ m.}$$

Aproximadamente a 6,5 metros desde planta calle, quiere decir, que asoma en la 1ª planta alrededor de un metro y medio. La ficha técnica del horno rotatorio es:

- Marca: Zhongke.
- Modelo: Rk50.
- Material: Acero inoxidable.
- Disposición espacial: Colocación horizontal.
- Potencia (KW): 18,5.
- Voltaje (V): 220 – 460.
- Ángulo de inclinación (%): 4.
- Peso (t): 15,2.
- Longitud (m): 10.
- Diámetro exterior (m): 3,10.
- Diámetro interior (m): 2,60.
- Volumen (m³): 51,4.
- Velocidad de giro (rpm): 6,3.
- Zonas de gradiente posibles: de 3 a 5.
- Certificación: ISO y CE.

Columna de lavado

Recibe el carbón activo con ácido. Las características del carbón activo son:

- $m_{CA} = 1.576 \text{ kg/colada}$.
- $\rho_{CA} = 2.100 \text{ kg/m}^3$.

Haciendo un volumen de carbón activo de:

$$V_{CA} = 1.576 / 2.100 = 0,7504 \text{ m}^3.$$

La temperatura con la que llegan, tanto el carbón activo como el resto del ácido, es aproximadamente la ambiental, por lo tanto la densidad del ácido será:

$$\rho_{a. \text{ Fosfórico}} = 1.680 \text{ kg/m}^3.$$

teniendo una masa conocida por el balance de masa de 1.961 kg/colada a la entra de la columna, se sabe que el volumen del ácido fosfórico es:

$$V_{a. \text{ Fosfórico}} = 1.961/1.680 = 1,1643 \text{ m}^3.$$

Juntando ambos volúmenes y contabilizando la pérdida de volumen por parte del ácido fosfórico, debido a los huecos y poros que tiene un lecho de carbón activo (pérdidas del 44%, dato que se consigue de manera experimental y obtenido por bibliografía), se tiene un volumen ocupado de columna por colada de:

$$V_{CA} + [V_{a. \text{ Fosfórico}} + (V_{a. \text{ Fosfórico}} \times 0,44)] = 0,7504 + 0,7684 = 1,52 \text{ m}^3.$$

Por medio del fabricante se elige un diámetro de columna de 1,5 metros y un volumen total de 10 m^3 . Con lo que la columna tiene una altura de:

$$\pi x r^2 x h; h = \frac{V}{\pi x r^2} = \frac{10}{\pi x 0,75^2} = 5,66 \text{ m}$$

El volumen requerido de columna es $1,52 \text{ m}^3$, que es un 15,2% del total del volumen de la columna.

Características de la columna:

- Marca: Fiplas.
- Modelo: TL100.
- Material: Cerámico recubierto de resina con resistencia química "VINILESTER".
- Disposición espacial: Vertical.
- Peso (t): 5,7.
- Longitud (m): 6,0.
- Diámetro (m): 1,46.
- Volumen (m^3): 10,0.

Secador de flujo a contracorriente

Para el secador se busca uno de entre los disponibles en el catálogo del suministrador. El único requisito que se le pide es que el volumen del secador sea aproximadamente igual a 10 veces el volumen de producto. Es decir, que la cantidad que se introduzca sea el 10% del volumen total de llenado. Este debe ser cumplido sin pasarse de los 15 metros de longitud que se tienen para la ocupación del horno. Con estos datos, se obtiene un secador con la siguiente ficha técnica:

- Marca: Shenzhen Yuhua Electro-Mechanic Co.
- Modelo: rp1012.
- Material: Acero galvanizado.
- Disposición espacial: Horizontal.
- Pendiente (%): 5.
- Peso (t): 13,24.
- Longitud (m): 12,0.
- Diámetro (mm): 1000,0.
- Volumen (m^3): 9,42.
- Volumen utilizado (m^3): 1,00.

Con este cálculo se finalizan las dimensiones necesarias de todos los aparatos de la empresa. Con ellos se puede realizar el último cálculo necesario, que es el de las redes de tuberías de la planta.

7.5. Bombas y tuberías

El transporte a través de tuberías en la planta se realiza en condiciones específicas, ya que el ácido siempre tiene que estar en estado líquido, pero su viscosidad a temperatura ambiente es un problema. Por eso, las condiciones de temperatura de ácido fosfórico, a la presión de 1 atm en la red de tuberías, son de 90 °C.

Las dimensiones de las tuberías deben calcularse a partir de los caudales necesarios en cada etapa del proceso.

Por ajustes del fabricante se fija la velocidad en tuberías de 1 m/s, ya que las tablas con los coeficientes de pérdida de carga son calculadas con esta cifra.

Mediante las ecuaciones 9 a 16 se harán los cálculos de todos los datos necesarios en el circuito de tuberías:

$$Q = s \times v \quad \text{Ecuación 9.}$$

$$s = \pi \frac{D^2}{4} \quad \text{Ecuación 10.}$$

$$Q = \dot{m}/\rho \quad \text{Ecuación 11.}$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad \text{Ecuación 12.}$$

$$hp = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 13.}$$

$$\varepsilon = \frac{e}{D} \quad \text{Ecuación 14.}$$

$$Pot = \gamma \times H_B \times Q \quad \text{Ecuación 15.}$$

$$H = \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + z \quad \text{Ecuación 16.}$$

Siendo:

- Q: Caudal (m^3/s).
- s: Sección de la tubería (m^2).
- v: Velocidad del fluido en la tubería (m/s).
- D: Diámetro de la tubería (m).
- \dot{m} : Flujo másico (kg/s).
- ρ : Densidad (kg/m^3).
- Re: Número de Reynolds (adimensional).
- μ : Viscosidad ($\text{kg/ms} = \text{Dp}$).
- h_p : Coeficiente de pérdida de cargas primarias. Ecuación de Darcy-Weisbach.
- f: Factor de fricción de Darcy. Parámetro adimensional que depende de la rugosidad relativa (ϵ) y de número Reynolds (Re).
- L: Longitud de la tubería (m).
- g: Gravedad (m/s^2).
- ϵ : Rugosidad relativa (adimensional).
- e: Espesor de la tubería (m).
- Pot: Potencia necesaria de la Bomba (kW).
- γ : Peso específico ($\text{kg/m}^2\text{s}$).
- H_B : Pérdida de carga de la bomba.
- H: Altura hidráulica (m). Necesaria para la pérdida de carga de la bomba.
- P: Presión (atm).
- z: Altura (m).

7.5.1. Bomba y tuberías ácido fosfórico para el tanque mezclador

Se tienen 3 depósitos de ácido fosfórico en planta calle, para su distribución al proceso. Uno por colada diaria, siendo el vaciado, llenado cuando le toca al otro, de forma manual. El tercer depósito es de reserva, en caso de fallo mecánico en uno de los otros circuitos.

El volumen introducido de ácido fosfórico en su interior es de:

$$m_{a. \text{ Fosfórico}} = 3.711 \text{ kg/colada.}$$

$$\rho_{a. \text{ Fosfórico}, 90^{\circ}\text{C}} = 1.350 \text{ kg/m}^3.$$

$$V_{a. \text{ Fosfórico}, 90^{\circ}\text{C}} = 3.711 \text{ kg/colada} / 1.350 \text{ kg/m}^3 = 2,75 \text{ m}^3.$$

La densidad tomada no es la del ácido a temperatura ambiente, ya que se tiene a 90 °C y la densidad es menor, haciendo mayor su volumen.

Sus características son:

- Material: Acero inoxidable.
- Altura (m): 4.
- Diámetro (m): 1.
- Volumen del tanque (m^3): 3,14.
- Volumen requerido (m^3): 2,75.
- % volumen de ácido (%): 87,5.
- Número de equipos: 3.

Con estos datos y los del ácido fosfórico, se realizan los cálculos necesarios, para llevarlo desde los depósitos, hasta el tanque de mezclado.

Se utilizan los datos del fabricante para las pérdidas de carga, y son dadas en la tabla 12. También se necesita el

diagrama de Moody, para el cálculo de las pérdidas de carga (figura 75):

Depósito 1

Características:

- v (m/s): 1.
- t de llenado (s): 600s.
- $\mu_{a. \text{ Fosfórico, } 90^{\circ}\text{C}} \approx 0,001 \text{ Dp}$ (funciona como el agua en estas condiciones).
- e tubería (m): 0,003.
- L (m): 30.
- P (atm): 1.
- z (m): 12,5.

Accesorios:

- 2 x válvula de compuerta.
- 2 x codo de 90° .
- 8 x manguitos de unión.

Con el volumen requerido y el tiempo de llenado se sabe el caudal que deben llevar en las tuberías:

$$Q = V / t = 2,75 \text{ m}^3 / 600 \text{ s} = 4,58 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}.$$

Teniendo la velocidad fijada por el fabricante se obtiene la sección de la tubería, la cual permite calcular el diámetro de tubería que se utilizará:

$$Q = s \times v; s = Q / v = 4,58 \times 10^{-3} / 1 = 4,58 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

$$s = \pi \times \frac{D^2}{4}; D = \sqrt{\frac{4 \times s}{\pi}} = 0,08 \text{ m. Como el fabricante da como mínimo un diámetro de 10 cm (0,1) se elige la tubería de DN10.}$$

Con el diámetro escogido, y sabiendo el resto de datos, se calcula el número de Reynolds, para saber si el flujo es turbulento o no.

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1350 \times 1 \times 0,1}{0,001} = 135.000 > 2.000$$

Será flujo turbulento.

Para poder calcular las pérdidas de carga se necesita Moody, y en el diagrama para poder calcular el factor de fricción se necesitan, el número de Reynolds y la rugosidad relativa. Es la siguiente:

$$\varepsilon = e/D = 0,003/0,1 = 0,03.$$

Con estos datos calculados, mirando en el diagrama se obtiene que el valor de f es:

$$f = 0,056.$$

Se calcula la pérdida de carga:

$$h_p = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} = 0,056 \times \frac{30}{0,1} \times \frac{1}{19,62} = 0,85627 \text{ m.}$$

$$h_s = 0,76 + 0,28 = 1,04 \text{ m.}$$

$$H = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = 12,5 + \frac{1,01325 \times 10^5}{1350 \times 9,81} + \frac{1}{19,62} = 20,20 \text{ m.}$$

Dando una pérdida de carga total de: 22,10 m.

Se obtiene la potencia de la bomba:

$$P = H_B \times \gamma \times Q = 22,10 \times 13.243,5 \times 4,58 \times 10^{-3} = 1.340,5 \text{ W} \\ = 1,3405 \text{ kW.}$$

Bomba necesaria para mover del depósito 1 el ácido fosfórico hasta el tanque mezclador en la 2ª planta. Se van a utilizar las bombas centrifugas circuladoras, para trasladar el

caudal dentro de la fábrica porque no se necesita mucha presión en el proceso de fabricación [42].

Depósito 2

Características:

- v (m/s): 1.
- t de llenado (s): 600s.
- $\mu_{a. \text{ Fosfórico, } 90^{\circ}\text{C}} \approx 0,001 \text{ Dp}$ (funciona como el agua en estas condiciones).
- e tubería (m): 0,003.
- L (m): 25.
- P (atm): 1.
- z (m): 12,5.

Accesorios:

- 2 x válvula de compuerta.
- 1 x codo de 90° .
- 1 x “te” de derivación.
- 8 x manguitos de unión.

Con el volumen requerido y el tiempo de llenado se sabe el caudal que deben llevar en las tuberías:

$$Q = V / t = 2,75 \text{ m}^3 / 600 \text{ s} = 4,58 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}.$$

Teniendo la velocidad fijada por el fabricante se obtiene la sección de la tubería, la cual permite calcular el diámetro de tubería que se utilizará:

$$Q = s \times v; s = Q / v = 4,58 \times 10^{-3} / 1 = 4,58 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

$$s = \pi \times \frac{D^2}{4}; D = \sqrt{\frac{4 \times s}{\pi}} = 0,08 \text{ m. Como el fabricante da como mínimo un diámetro de 10 cm (0,1) se elige la tubería de DN10.}$$

Con el diámetro escogido, y sabiendo el resto de datos, se calcula el número de Reynolds, para saber si el flujo es turbulento o no.

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1350 \times 1 \times 0,1}{0,001} = 135.000 > 2.000$$

Será flujo turbulento.

Para poder calcular las pérdidas de carga se necesita Moody, y en el diagrama para poder calcular el factor de fricción se necesitan, el número de Reynolds y la rugosidad relativa. Es la siguiente:

$$\varepsilon = e/D = 0,003/0,1 = 0,03.$$

Con estos datos calculados, mirando en el diagrama se obtiene que el valor de f es:

$$f = 0,056.$$

Se calcula la pérdida de carga:

$$h_p = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} = 0,056 \times \frac{25}{0,1} \times \frac{1}{19,62} = 0,71356 \text{ m.}$$

$$h_s = 0,38 + 0,28 + 1,80 = 2,46 \text{ m.}$$

$$H = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = 12,5 + \frac{1,01325 \times 10^5}{1350 \times 9,81} + \frac{1}{19,62} = 20,20 \text{ m.}$$

Dando una pérdida de carga total de: 23,37 m.

Se obtiene la potencia de la bomba:

$$P = H_B \times \gamma \times Q = 23,37 \times 13.243,5 \times 4,58 \times 10^{-3} = 1.417,7 \text{ W} \\ = 1,4177 \text{ kW.}$$

Bomba necesaria para mover del depósito 2 el ácido fosfórico hasta el tanque mezclador en la 2ª planta. Se utilizan las bombas centrifugas circuladoras, para trasladar el

caudal dentro de la fábrica porque se trabaja a presión atmosférica [43].

Depósito 3

Características:

- v (m/s): 1.
- t de llenado (s): 600s.
- $\mu_{a. \text{ Fosfórico, } 90^{\circ}\text{C}} \approx 0,001 \text{ Dp}$ (funciona como el agua en estas condiciones).
- e tubería (m): 0,003.
- L (m): 30.
- P (atm): 1.
- z (m): 12,5.

Accesorios:

- 2 x válvula de compuerta.
- 1 x codo de 90° .
- 1 x “te” de confluencia.
- 6 x manguitos de unión.

Con el volumen requerido y el tiempo de llenado se sabe el caudal que deben llevar en las tuberías:

$$Q = V / t = 2,75 \text{ m}^3 / 600 \text{ s} = 4,58 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}.$$

Teniendo la velocidad fijada por el fabricante se obtiene la sección de la tubería, la cual permite calcular el diámetro de tubería que se utilizará:

$$Q = s \times v; s = Q / v = 4,58 \times 10^{-3} / 1 = 4,58 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

$$s = \pi \times \frac{D^2}{4}; D = \sqrt{\frac{4xs}{\pi}} = 0,08 \text{ m. Como el fabricante da como mínimo un diámetro de 10 cm (0,1) se elige la tubería de DN10.}$$

Con el diámetro escogido, y sabiendo el resto de datos, se calcula el número de Reynolds, para saber si el flujo es turbulento o no.

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1350 \times 1 \times 0,1}{0,001} = 135.000 > 2.000$$

Será flujo turbulento.

Para poder calcular las pérdidas de carga se necesita Moody, y en el diagrama para poder calcular el factor de fricción se necesitan, el número de Reynolds y la rugosidad relativa. Es la siguiente:

$$\varepsilon = e/D = 0,003/0,1 = 0,03.$$

Con estos datos calculados, mirando en el diagrama se obtiene que el valor de f es:

$$f = 0,056.$$

Se calcula la pérdida de carga:

$$h_p = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} = 0,056 \times \frac{30}{0,1} \times \frac{1}{19,62} = 0,85627 \text{ m.}$$

$$h_s = 0,38 + 0,28 + 0,10 = 0,76 \text{ m.}$$

$$H = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = 12,5 + \frac{1,01325 \times 10^5}{1350 \times 9,81} + \frac{1}{19,62} = 20,20 \text{ m.}$$

Dando una pérdida de carga total de: 21,82 m.

Se obtiene la potencia de la bomba:

$$P = H_B \times \gamma \times Q = 21,82 \times 13.243,5 \times 4,58 \times 10^{-3} = 1.323,3 \text{ W} \\ = 1,3233 \text{ kW.}$$

Bomba necesaria para mover del depósito 3 el ácido fosfórico hasta el tanque mezclador en la 2ª planta. Igual que en los depósitos 1 y 2, la bomba elegida es una centrífuga para presiones bajas [44].

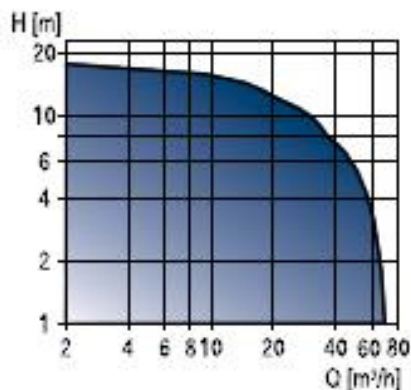
Cada depósito tiene 2 bombas, una de reserva, para evitar problemas o por causas de mantenimiento de la que se encuentre en uso. Son bombas circuladoras. Las bombas que menos gastan son las del depósito número 1 y la del número 3, luego, son los depósitos titulares, siendo el reserva el número 2.

La ficha técnica de las bombas elegidas para estos depósitos es la siguiente, y la marca elegida para las bombas es GRUNDFOS:



UPS Serie 200

Bombas circuladoras, del tipo de rotor encapsulado



Datos técnicos

Caudal, Q:	máx. 70 m ³ /h
Altura, H:	máx. 18 m
Temp. líquido:	-10°C a +120°C
Presión sistema:	máx. 10 bar

Aplicaciones

Circulación de agua caliente o fría en

- Sistemas de calefacción
- Sistemas de agua caliente sanitaria
- Sistemas de refrigeración y aire acondicionado.

Características y ventajas

- Libre de mantenimiento
- Interruptor térmico integrado
- Silenciosa
- Bajo consumo
- Clasificación energética hasta clase B
- Monofásica con módulo de protección incorporado
- Amplia gama.

Opcional

- Módulo de protección
- Módulo relé con señal de fallo o potencia de funcionamiento
- Carcasa de la bomba en bronce
- Versiones dobles.

FIG. 69. BOMBAS PARA DEPÓSITOS DE H₃PO₄ (GRUNDFOS).

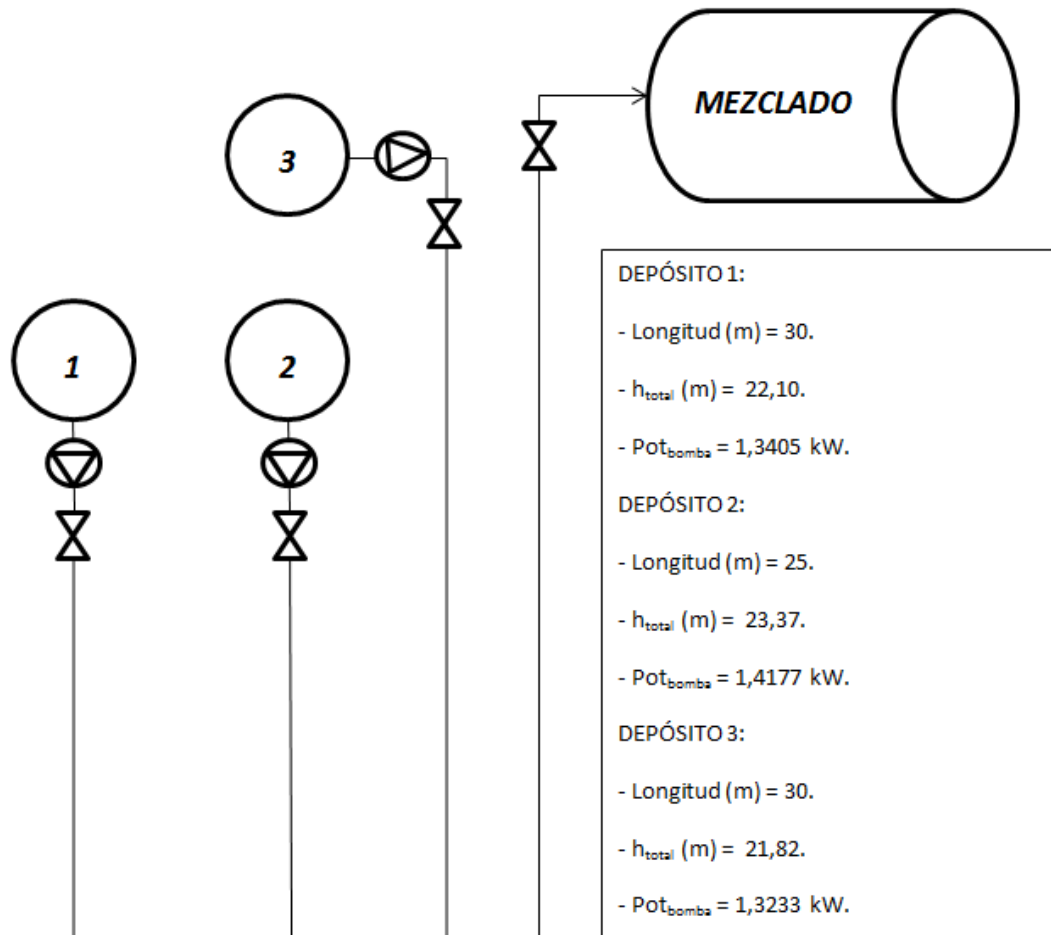


FIG. 70. RED DE TUBERÍAS DEL MEZCLADO.

En la elección de las tuberías en este circuito, se tiene en cuenta la elevada temperatura del ácido. Por ello, se escoge el acero inoxidable frente al PVC ya que se alcanzan temperaturas cercanas a los 100 °C y el PVC podría degradarse a esas temperaturas, y frente al cobre porque es un material más barato y menos dúctil.

7.5.2. Bombas y tuberías de la 4ª fase del horno: Enfriamiento

Intercambiador de calor

Se abastece de la red de aguas que se tiene en la empresa. el circuito empieza en planta baja, pero la longitud entre ellas es pequeña, solo tiene que superar la altura que existe hasta la parte superior de la fase cuatro del horno, quiere decir, la parte más baja.

Para ello se tienen los siguientes datos de las tuberías:

Características:

- v (m/s): 1.
- t de enfriamiento (s): 1.200.
- $\mu_{\text{agua}, 20-75^{\circ}\text{C}} \approx 0,001 \text{ Dp}$.
- e tubería (m): 0,003.
- L (m): 10.
- z (m): 6.
- P (atm): 1.
- $\rho_{\text{agua}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$.
- \dot{m} que se debe suministrar = 6,1456 kg/s.

Accesorios:

- 2 x válvula de compuerta.
- 2 x codo de 90° .
- 4 x manguitos de unión.

Con el flujo másico requerido, en base al tiempo de enfriamiento y con la densidad del agua, se calcula el caudal que deben llevar en las tuberías:

$$Q = \dot{m} / \rho_{\text{agua}} = 6,1456 \text{ kg/s} / 1.000 \text{ kg/m}^3 = 6,1456 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}.$$

Teniendo la velocidad fijada por el fabricante en 1 m/s, se obtiene la sección de la tubería, la cual permite calcular el diámetro de tubería que se utilizará:

$$Q = s \times v; s = Q / v = 6,1456 \times 10^{-3} / 1 = 6,1456 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

$$s = \pi \times \frac{D^2}{4}; D = \sqrt{\frac{4 \times s}{\pi}} = 0,09 \text{ m.}$$

Como el fabricante da como mínimo un diámetro de 10 cm (0,1) se elige la tubería de DN10.

Con el diámetro escogido, y sabiendo el resto de datos, se calcula el número de Reynolds, para saber si el flujo es turbulento o no.

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 1 \times 0,1}{0,001} = 100.000 > 2.000$$

Será flujo turbulento.

Para poder calcular las pérdidas de carga se necesita Moody, y en el diagrama para poder calcular el factor de fricción se necesitan, el número de Reynolds y la rugosidad relativa. Es la siguiente:

$$\varepsilon = e/D = 0,003/0,1 = 0,03.$$

Con estos datos calculados, mirando en el diagrama se obtiene que el valor de f es:

$$f = 0,057.$$

Se calcula la pérdida de carga, siendo la altura máxima que supera la tubería de 6 metros, para entrar por encima del horno:

$$h_p = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} = 0,057 \times \frac{10}{0,1} \times \frac{1}{19,62} = 0,2905 \text{ m.}$$

$$h_s = 0,76 + 0,28 = 1,04 \text{ m.}$$

$$H = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = 6,0 + \frac{1,01325 \times 10^5}{1000 \times 9,81} + \frac{1}{19,62} = 16,38 \text{ m.}$$

Dando una pérdida de carga total de: 17,71 m.

Se obtiene la potencia de la bomba:

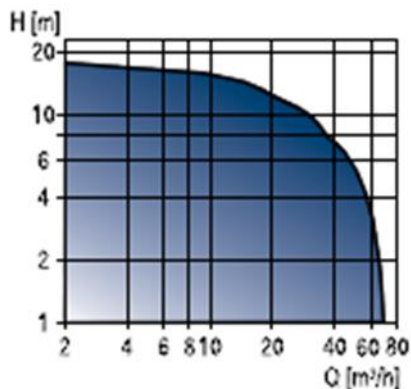
$$P = H_B \times \gamma \times Q = 17,71 \times 9810 \times 6,1456 \times 10^{-3} = 1.067,7 \text{ W} \\ = 1,0677 \text{ kW.}$$

Potencia de bomba necesaria para mover un flujo másico de agua de 6,1456 kg/s en la cuarta fase del horno situado en la 2ª planta. Así se consigue bajar la temperatura del producto de 500 a 150 °C y el agua sale a 75 °C. Bomba centrífuga para bajas presiones [45]. Ficha técnica de las bombas GRUNDFOS:



UPS Serie 200

Bombas circulatoras, del tipo de rotor encapsulado



Datos técnicos

Caudal, Q:	máx. 70 m³/h
Altura, H:	máx. 18 m
Temp. líquido:	-10°C a +120°C
Presión sistema:	máx. 10 bar

Aplicaciones

Circulación de agua caliente o fría en

- Sistemas de calefacción
- Sistemas de agua caliente sanitaria
- Sistemas de refrigeración y aire acondicionado.

Características y ventajas

- Libre de mantenimiento
- Interruptor térmico integrado
- Silenciosa
- Bajo consumo
- Clasificación energética hasta clase B
- Monofásica con módulo de protección incorporado
- Amplia gama.

Opcional

- Módulo de protección
- Módulo relé con señal de fallo o potencia de funcionamiento
- Carcasa de la bomba en bronce
- Versiones dobles.

FIG. 71. BOMBAS PARA INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LA 4ª FASE DEL HORNO (GRUNDFOS).

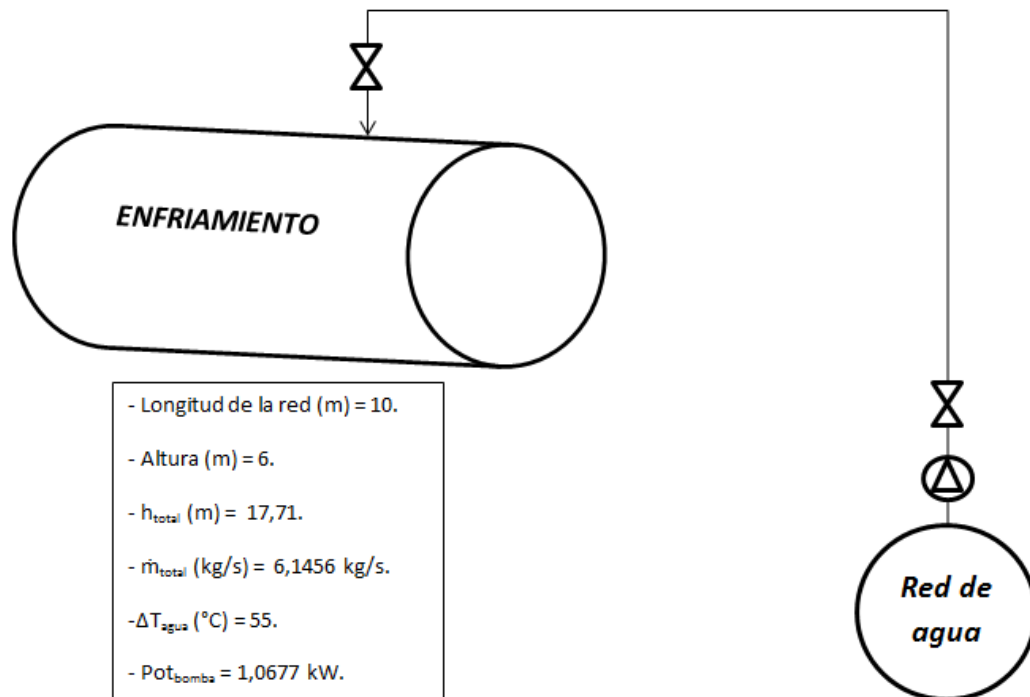


FIG. 72. RED DE TUBERÍAS DEL HORNO.

En la elección de las tuberías en este circuito, se tiene en cuenta la temperatura de salida del agua. Por ello, se eligen otra vez las de acero inoxidable frente al PVC ya que la temperatura de salida es de 75 °C y el PVC podría degradarse a esas temperaturas.

7.5.3. Bombas y tuberías del lavado

Agua de entrada a la columna de lavado

Se abastece la columna con agua de la red que se tiene en la empresa. El circuito empieza en planta baja, y tiene que subir hasta la segunda planta la longitud entre ellas es media, siendo la altura un valor alto que influirá en la pérdida de carga.

Se hacen lavados rápidos para eliminar el ácido fosfórico, el agua llega al tanque, llenándolo de manera rápida, y saliendo de él de la misma manera, siendo por un controlador de pH, con el que se controla el número de lavados que hay que hacer. Cuando el pH de la disolución de salida, agua + ácido fosfórico, deja de ser 1, para tener valores más próximos al neutro, se puede decir que el carbón activo está purificado y que se puede llevar al secado.

Para ello se tienen los siguientes datos de las tuberías y de la columna de lavado:

Características:

- v (m/s): 1.
- $\mu_{\text{agua}, 20^{\circ}\text{C}} \approx 0,001 \text{ Dp}$.
- e tubería (m): 0,003.
- L (m): 20.
- z (m): 15.
- P (atm): 1.
- $\rho_{\text{agua}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$.
- t de llenado (s) = 300.
- V de la columna (m^3) = 10.
- V de llenado (m^3) = 7,5.

Accesorios:

- 2 x válvula de compuerta.
- 2 x codo de 90°.
- 4 x manguitos de unión.

Con el volumen de agua que se mete por lavado, en base al tiempo de llenado de la torre, se calcula el caudal que deben llevar en las tuberías:

$$Q = V / t = 7,5 \text{ m}^3 / 300 \text{ s} = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Teniendo la velocidad fijada por el fabricante en 1 m/s, se obtiene la sección de la tubería, la cual permite calcular el diámetro de tubería que se utilizará:

$$Q = s \times v; s = Q / v = 0,025 / 1 = 0,025 \text{ m}^2.$$

$s = \pi \times \frac{D^2}{4}; D = \sqrt{\frac{4 \times s}{\pi}} = 0,18 \text{ m}$. Como el fabricante da como diámetro el de 10 cm (0,1) y el de 20 cm (0,2) se elige la tubería de DN20.

Con el diámetro escogido, y sabiendo el resto de datos, se calcula el número de Reynolds, para saber si el flujo es turbulento o no.

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 1 \times 0,2}{0,001} = 200.000 > 2.000$$

Será flujo turbulento.

Para poder calcular las pérdidas de carga se necesita Moody, y en el diagrama para poder calcular el factor de fricción se necesitan, el número de Reynolds y la rugosidad relativa. Es la siguiente:

$$\varepsilon = e/D = 0,003/0,1 = 0,03.$$

Con estos datos calculados, mirando en el diagrama se obtiene que el valor de f es:

$$f = 0,056.$$

Se calcula la pérdida de carga, siendo la altura máxima que supera la tubería de 15 metros, para entrar por encima de la columna de lavado situada en la parte más elevada de la planta:

$$h_p = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} = 0,056 \times \frac{20}{0,2} \times \frac{1}{19,62} = 0,2854 \text{ m.}$$

$$h_s = 1,00 + 0,36 = 1.36 \text{ m.}$$

$$H = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = 15,0 + \frac{1,01325 \times 10^5}{1000 \times 9,81} + \frac{1}{19,62} = 25,38 \text{ m.}$$

Dando una pérdida de carga total de: 27,02 m.

Se obtiene la potencia de la bomba:

$$P = H_B \times \gamma \times Q = 27,02 \times 9810 \times 0,025 = 6.626,6 \text{ W} = 6,6266 \text{ kW.}$$

Potencia de bomba necesaria para llenar la columna en 5 minutos de agua. Así se consigue eliminar el ácido del carbón activo. Potencia requerida más grande de todas. Bombas centrífugas de impulsión para bajas presiones [46].

Agua de salida de la columna de lavado hacia los depósitos de H_3PO_4 al 5%

Se lleva la disolución desde la columna hasta los depósitos. El circuito empieza a la salida de la columna de lavado. Esta se encuentra entre la 2ª planta y la 1ª debido a sus casi 6 metros de altura, y tiene que subir hasta la altura de los depósitos, que empiezan en planta calle, pero como tienen una gran altura, $h = 10 \text{ m}$, habrá que obtener un circuito que suba la disolución desde la parte baja de la columna de lavado hasta la parte alta de los depósitos.

Los depósitos son exactamente iguales, y el abastecimiento proviene de la misma bomba, siendo elegido uno u otro depósito por medio de una válvula de 3 vías. De esta manera, se elige el camino más largo para el cálculo de la potencia de la bomba, para que pueda llegar a las dos sin problemas. Aunque sea un gasto mayor en potencia, nos ahorramos un circuito de tuberías completo.

Para ello se tienen los siguientes datos de las tuberías y de los depósitos:

Características:

- v (m/s): 1.
- $\mu_{\text{disolución, } 20^{\circ}\text{C}} \approx 0,001 \text{ Dp.}$
- e tubería (m): 0,003.
- L (m): 10.
- z (m): 6.
- P (atm): 1.
- $\rho_{\text{agua}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$.
- t de llenado (s) = 300.
- Número de lavados = 4.
- Volumen de agua por lavado (m^3) = 5,98.
- Volumen de H_3PO_4 que quitar (m^3) = 1,1643.

Accesorios:

- 1 x válvula de compuerta.
- 1 x válvula de compuerta de 3 vías.
- 4 x codo de 90° .
- 4 x manguitos de unión.

Con el volumen de agua que se mete por lavado, en base al tiempo de vaciado de la torre, más la porción que se lleva por lavado el agua, se calcula el caudal que deben llevar en las tuberías:

$$Q = V / t = (5,98 + 0,29) \text{ m}^3 / 300 \text{ s} = 0,0209 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Teniendo la velocidad fijada por el fabricante en 1 m/s, se obtiene la sección de la tubería, la cual permite calcular el diámetro de tubería que se utilizará:

$$Q = s \times v; s = Q / v = 0,0209 / 1 = 0,0209 \text{ m}^2.$$

$s = \pi \times \frac{D^2}{4}; D = \sqrt{\frac{4 \times s}{\pi}} = 0,17 \text{ m}$. Como el fabricante da como diámetro el de 10 cm (0,1) y el de 20 cm (0,2) se elige la tubería de DN20, por estar más próximo a 20 que a 10.

Con el diámetro escogido, y sabiendo el resto de datos, se calcula el número de Reynolds, para saber si el flujo es turbulento o no.

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 1 \times 0,2}{0,001} = 200.000 > 2.000$$

Será flujo turbulento.

Para poder calcular las pérdidas de carga se necesita Moody, y en el diagrama para poder calcular el factor de fricción se necesitan, el número de Reynolds y la rugosidad relativa. Es la siguiente:

$$\varepsilon = e/D = 0,003/0,1 = 0,03.$$

Con estos datos calculados, mirando en el diagrama se obtiene que el valor de f es:

$$f = 0,056.$$

Se calcula la pérdida de carga, siendo la altura máxima que supera la tubería de 6 metros, para entrar por encima de los depósitos de disolución:

$$h_p = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} = 0,056 \times \frac{10}{0,2} \times \frac{1}{19,62} = 0,1427 \text{ m}.$$

$$h_s = 2,00 + 0,18 + 0,33 = 2,51 \text{ m}.$$

$$H = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = 6,0 + \frac{1,01325 \times 10^5}{1000 \times 9,81} + \frac{1}{19,62} = 16,38 \text{ m.}$$

Dando una pérdida de carga total de: 19,03 m.

Se obtiene la potencia de la bomba:

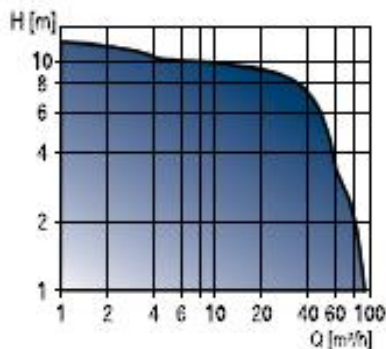
$$P = H_B \times \gamma \times Q = 19,03 \times 9810 \times 0,0209 = 3.902,2 \text{ W} = 3,9022 \text{ kW.}$$

Potencia de bomba necesaria para llevar al depósito la cantidad de agua más ácido que existe en la columna por lavada. Así se consigue separar el carbón activo y llevarlo al secado. Todas las bombas elegidas son centrífugas y para uso con presión atmosférica [47]. Ficha técnica de las bombas GRUNDFOS:



GRUNDFOS MAGNA, Serie 2000

Bombas circuladoras, del tipo de rotor encapsulado, controladas electrónicamente



Datos técnicos

Caudal, Q:	máx. 90 m ³ /h
Altura, H:	máx. 12 m
Temp. líquido:	+15°C a +110°C
Presión sistema:	máx. 10 bar

Aplicaciones

Circulación de agua caliente en

- Sistemas de calefacción para bloques de viviendas, colegios, hospitales, hoteles, industria, etc.

Características y ventajas

- Silenciosa
- Bajo consumo
- Clasificación energética: Clase A
- Amplia gama
- Ajuste automático del funcionamiento
- Instalación sencilla, sin necesidad de equipos o ajustes adicionales
- Selección segura.

Opcional

- Cuerpo de bomba de acero inoxidable
- Versiones dobles
- Control remoto inalámbrico, R100
- Comunicación GENIbus o LON.

FIG. 73. BOMBAS PARA CIRCUITO DE LAVADO (GRUNDFOS).

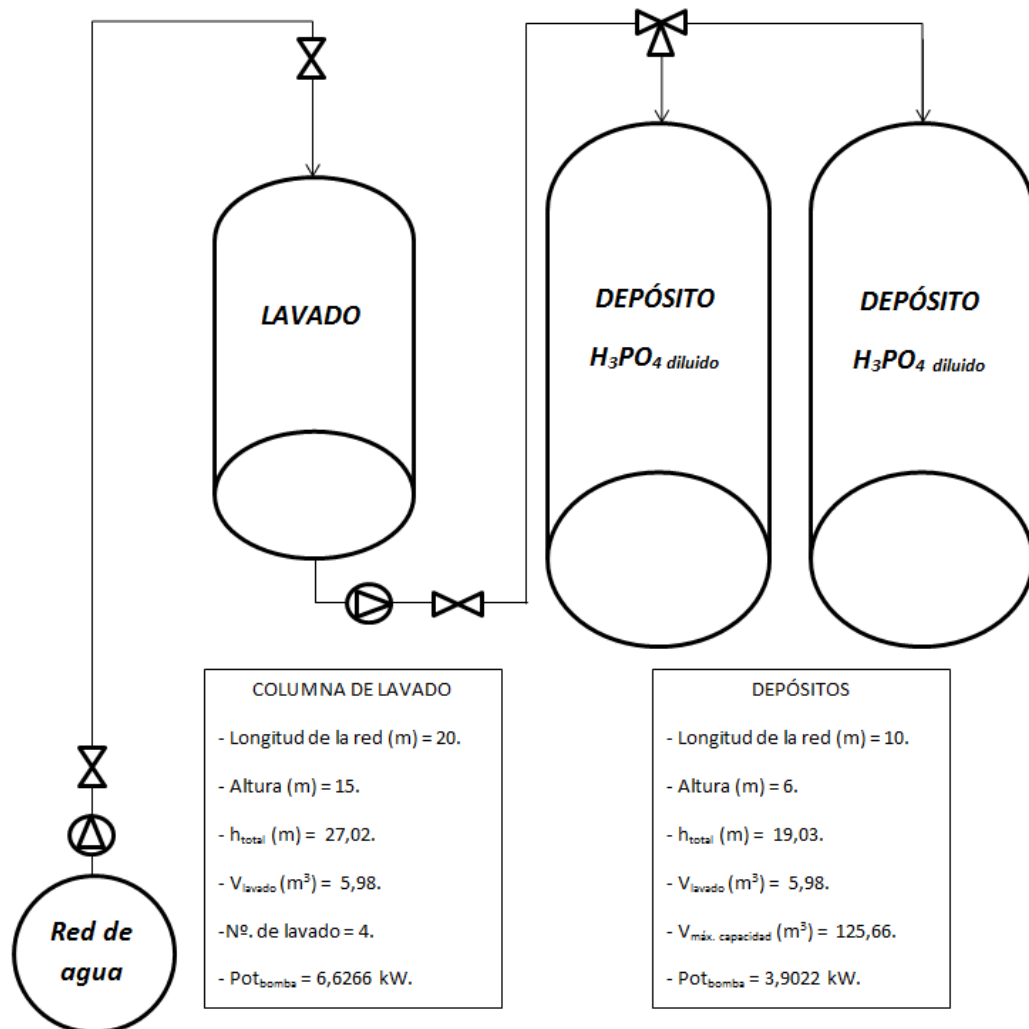


FIG. 74. RED DE TUBERÍAS DEL LAVADO.

Para esta red de tuberías se podía elegir cualquier material disponible para tuberías, pero siendo toda la planta suministrada por tuberías de acero inoxidable, se opta por no cambiar de producto.

Con esto se acaban los cálculos de tuberías de la empresa, viendo que el proceso más costoso en cuanto a potencia se refiere es el del lavado y el de la extracción y almacenamiento de la disolución diluida.

A continuación la tabla 12, utilizada durante todos los cálculos y el diagrama de Moody (figura 75).

TABLA 12. PÉRDIDAS DE CARGA POR ACCESORIOS SEGÚN TUBERÍA ELEGIDA. SUMINISTRADA POR EL FABRICANTE.

		DN 10	DN 15	DN 20	DN 25	DN 32	DN 40	DN 50	DN 65	DN 80	DN 100
	Manguito de unión	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,09	0,12	0,15
	Codo de reducción	0,20	0,30	0,50	0,65	0,85	1,00	1,30	2,00	2,30	3,00
	Codo 45	0,20	0,34	0,43	0,47	0,56	0,70	0,83	1,00	1,18	1,25
	Codo 90	0,38	0,50	0,63	0,76	1,01	1,32	1,71	1,94	2,01	2,21
	"te" 45	1,02	0,84	0,90	0,96	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70
	"te" confluencia	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
	"te" derivación	1,80	2,50	3,00	3,60	4,10	4,60	5,00	5,50	6,20	6,90
	Válvula de compuerta	0,14	0,18	0,21	0,26	0,36	0,44	0,55	0,69	0,81	1,09

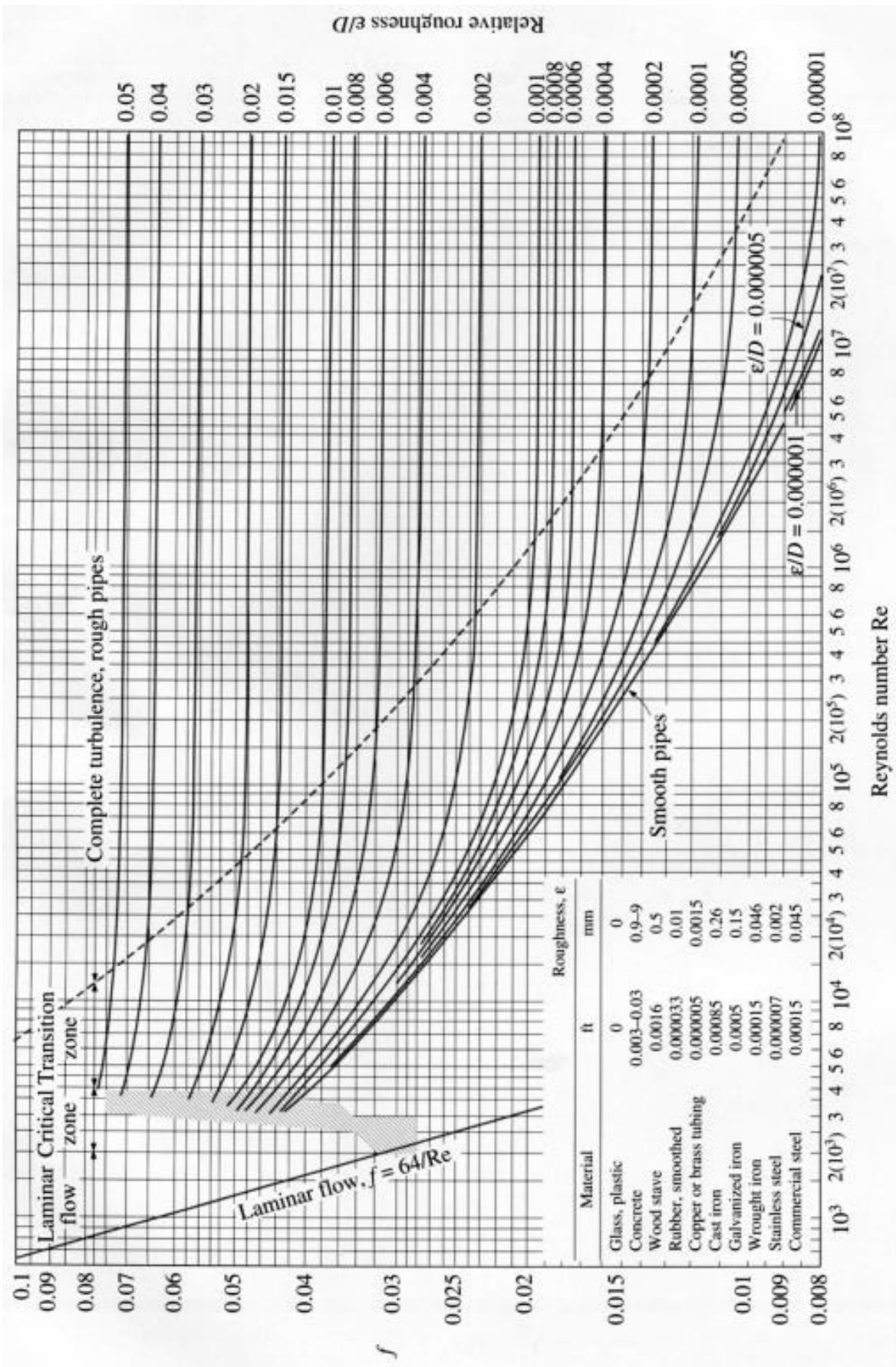


FIG. 75. DIAGRAMA DE MOODY.

8. FUENTES DE INFORMACIÓN

[1] –Tipos de Adsorción. Empresa Desotec [No disponible]
http://www.desotec.com/ES/carbon_activo/p14/_que_es_la_adsorcion [consulta: 5 Junio 2013].

[2] – Definición de Adsorción. Empresa Cabot [en línea]
<http://www.norit.com/carbon-academy/what-is-adsorption/>
[consulta: 5 Junio 2013].

[3] – Adsorción del carbón activo, tabla. Última modificación 26/06/2002. Disponible en:
http://www.perfchem.com/pages/carbon_chem.htm
[consulta: 5 Junio 2013].

[4] – Diccionario Mosby – Medicina, enfermería y ciencias de la salud. Ed. Hancourt, S. A. 1999. Significado de tamiz molecular. Disponible en:
http://www.esacademic.com/dic.nsf/es_mediclopedia/51995/tamiz [consulta: 5 Junio 2013].

[5] – Rodríguez, 2005; Bandosz, 2006 (Bandosz, T.; Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation. Interface science and technology, Elsevier, New York: 7(3), 107-153 (2006)) [consulta: 5 Junio 2013].

[6] – Desodorización del carbón. Empresa Genfiltro. [en línea] Disponible en:
http://genfiltro.es/?page_id=528&gclid=CPnysfyFz7YCFZlPtAodLAKAyw [consulta: 5 Junio 2013].

[7] – Empresa Chiemivall. Introducción al carbón activo [en línea]
http://www.carbonactivo.com/web/index.php?option=com_content&task=view&id=50&Itemid=81 [consulta: 12 Junio 2013]

[8] – “Antecedentes Históricos” [en línea] Disponible en: <http://articulos.aquamillfactory.com/?p=619> [consulta: 12 Junio 2013].

[9] – Empresa Chiemivall. Introducción a las materias primas. [en línea] http://www.carbonactivo.com/web/index.php?option=com_content&task=view&id=51&Itemid=82 [consulta: 13 Junio 2013].

[10] – Martíne Reysond, Renato. Columnas de carbón activado. EAP Ing. Química. Disponible en: <http://www.slideshare.net/renatolachira/carbn-activado> Mayo 2010 [consulta: 2 Julio 2013].

[11] – El carbón activo y sus propiedades. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20980/Capitulo1.pdf> [consulta: 3 Julio 2013].

[12] – El carbón activado granular en el tratamiento del agua. Groso Cruzado, German, Ed. Aconcagua Ediciones y publicaciones. 1ª edición, 2002, México.

[13] –Tipos de carbón activo. Empresa Chiemivall [en línea] disponible en: http://www.carbonactivo.com/web/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=27 [consulta: 3 Julio 2013].

[14] – Tecnología de la madera. Vignote Peña, Santiago e Isaac Martínez rojas, Ed. Mundi-Prensa. 3ª edición, 2006, México.

[15] – Significado de Isótropo. Diccionario de astronomía, publicado 2001. Disponible en: <http://www.astromia.com/glosario/isotropo.htm> [consulta: 9 Julio 2013].

[16] – Producción de carbón activado a partir de precursores carbonosos en Colombia. ed. 2010, disponible en:

<http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v57n2/a10v57n2>.

[consulta: 10 Julio 2013].

[17] – Hornos rotatorios. [en línea] Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/6909/1/Mart%C3%ADn%20Gull%C3%B3n,%20Ignacio.%20t.1.pdf> [consulta: 10 Julio 2013].

[18] – Significado de coquizar. [en línea] disponible en: <http://lema.rae.es/drae/?val=coquizante> [consulta: 10 Julio 2013].

[19] – Activación térmica del carbón. [en línea] Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/6909/1/Mart%C3%ADn%20Gull%C3%B3n,%20Ignacio.%20t.1>. [consulta: 11 Julio 2013].

[20] – Activación química y nanoestructuras del carbono. [en línea]. Disponible en: <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/2387> [consulta: 11 Julio 2013].

[21] – Artículo de información publicado en: Mohanty et al., editado 2008. [consulta: 11 Julio 2013].

[22] – Significado de briquetas. [en línea] Disponible en: <http://tiendabiomasa.com/briquetas.html> [consulta: 11 Julio 2013]

[23] – Control de la calidad del agua: procesos fisicoquímicos. J. Weber, Walter. Ed. Reverté. 1ª edición, 2003, Barcelona.

[24] – Transporte neumático. [en línea]. Disponible en: <http://manipulaciondesolidos.es/2008/11/18/conceptos-basicos-del-transporte-neumatico/> [consulta: 15 Julio 2013].

[25] – Ingeniería Química: Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte. J. Costa López, S. Cervera March, F. Cunill García, S. Esplugas Vidal, C.

Mans Teixido, J. Mata Álvarez. Ed. Reverté S. A. [consulta: 15 Julio 2013].

[26] – Empresa Norit. Capacidad del horno/reactor/mezclador. Depósito en Norit. [en línea]. Disponible en: http://www.ruralcat.net/c/document_library/get_file?uuid=cfa90a87-7493-45f5-9fd2-f160d6b9581d&groupId=10136 [consulta: 15 Julio 2013].

[27] – Aplicaciones del Carbón activo. [en línea]. Disponible en: http://www.carbonactivo.com/web/index.php?option=com_content&task=view&id=46 [consulta: 21 Julio 2013].

[28] – Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización. Rodríguez Vidal, Francisco Javier, ed. Ediciones Díaz de Santos, 1ª edición, editado 2003, Madrid.

[29] – Pueyo Mena, Eva. El carbón activo: Usos y aplicaciones. Proyecto fin de carrera, publicado en 2010, Zaragoza. No disponible [consulta: 28 Julio 2013].

[30] – Regeneración del carbón activo. [en línea] Disponible en: http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/fondo/pdf/44081_20.pdf [consulta: 2 Agosto 2013].

[31] – Tipos de regeneración del carbón activo. [en línea]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/regeneracion-carbon-activo.htm> [consulta: 2 Agosto 2013].

[32] – Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Frederick S. Baker, Charles E. Miller, Albert J. Repik, E. Donald Tolles. Publicado 2000. [en línea] [consulta: 2 Agosto 2013].

[33] – Plataforma logística Industrial Huesca-Sur. [en línea]. Disponible en:

<http://www.huesca.es/areas/desarrollo/zonas-empresariales/plataforma-logistica-industrial-huesca-sur/>
[consulta: 10 Agosto 2013].

[34] – Densidades de la madera. [en línea]. Disponible en: http://www.cesefor.com/cubifor/descargas/Densidad_Madera.pdf [consulta 10 Agosto 2013].

[35] – Propiedades del ácido fosfórico a temperatura ambiente. [en línea]. Disponible en: <http://iio.ens.uabc.mx/hojas-seguridad/acido%20fosforico.pdf> [consulta: 10 Agosto 2013].

[36] – Ácido fosfórico a distintas condiciones de trabajo. [en línea]. Disponible en: <http://spanish.alibaba.com/products/phosphoric-acid-85-food-grade-prices-878051369>.
[consulta: 12 Agosto 2013].

[37] – Obtención del horno y del ácido fosfórico. Catálogo. [en línea]. Disponible en: <http://spanish.alibaba.com/products/activated-carbon-kiln.html> [consulta: 15 Agosto 2013].

[38] – Curso de Ingeniería Química: Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte. J. Costa López, S. Cervera March, F. Cunill García, S. Esplugas Vidal, C. Mans Teixido, J. Mata Álvarez., Ed. Reverté, última vez editado 1999. [en línea] Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0471238961.0103200902011105.a01/abstract;jsessionid=C92CCA1358B8A659FD648E1B0DA631E7.d04t02?deniedAccessCustomisedMessage=&userIsAuthenticated=false> [consulta: 15 Agosto 2013].

[39] –Operaciones Básicas de Ingeniería química. Warren L. McCabe, Julian C. Smith. Editorial Reverté. 1973. 4ª edición, 2003, Sevilla.

[40] – Sistemas de unidades físicas. Galán García, J.L. Ed. Reverté. 1987. 1ª edición, España. [en línea]. Disponible en: <http://books.google.es/books?id=iJMTyEe0vBcC&pg=PA61&lp g=PA61&dq=decapoise+unidad+sistema+internacional&source=bl&ots=bGn2yo2Vme&sig=va2jld43OtSmSS-ihBm89vpE5bg&hl=es&sa=X&ei=LXAkUoKVCZOS7AbY5YC4Aw&ved=0CDMQ6AEwAA#v=onepage&q=decapoise%20unidad%20sistema%20internacional&f=false> [consulta: 15 Agosto 2013].

[41] – Características de la madera y el carbón activo. Calores específicos. [en línea] Disponible en: <http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/123456789/1792/1/COMPOSICIONQUIMICADELAMADERADECINCOESPECIESDEPINODELMUNICIPIODEMORELIAMICHOACANMEXICO.pdf>, http://www.sapiensman.com/conversion_tables/peso_especifico.htm [consulta: 15 Agosto 2013].

[42, 43, 44, 45, 46, 47] – Catálogos GRUNDFOS, para obtención de los datos de bombas y tuberías. [en línea]. Disponible en : <http://www.daunis.es/Catalogos-Tarifas/E-I/Grundfos> [consulta: 4 Septiembre].

[EMPRESAS]

<http://www.norit.com/>

<http://www.clarimex.com/>

<http://www.brascarbo.com.br/>

<http://www.dcffm.de/index-e.html>

<http://www.chemvironcarbon.com/es/lacompania>

<http://www.carbotecnia.info/>